

مدلسازی عددی و فیزیکی خصوصیات جریان در کانال مرکب منشوری با زبری ناهمگن

شادی نجفیان، حجت‌اله یونس، عباس پارسایی* و حسن ترابی پوده**

* نگارنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران. تلفن: ۰۶۶۳۳۱۲۰۱۰۶، پیام‌نگار: abbas_parsaie@yahoo.com

** به‌ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی؛ استادیار؛ دانشجوی دکتری سازه‌های آبی؛ و دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه

لرستان

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۲۰

چکیده

مدلسازی خصوصیات جریان در کانال‌های مرکب یکی از مهمترین مسائل مهندسی هیدرولیک است. از مهمترین پارامترهای جریان در کانال‌های مرکب نیز می‌توان به تنش برشی ظاهری اشاره کرد که در اثر اختلاف سرعت جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در محل اتصال کانال اصلی به سیلاب‌دشت‌ها به‌وجود می‌آید. تنش برشی ظاهری باعث ایجاد آشفتگی و گردابه‌های سه‌بعدی در مرز کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها می‌شود. اختلاف بین زبری کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها نیز یکی دیگر از عوامل تشدیدکننده تنش برشی ظاهری در مرز بین زیر مقاطع کانال مرکب است. در این تحقیق، خصوصیات جریان در کانال مرکب منشوری با زبری ناهمگن با استفاده از مدلسازی فیزیکی و عددی بررسی شده است. مدلسازی فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تهران و مدلسازی عددی آن با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالاتی محاسباتی Flow 3D انجام گرفته است. نتایج هر دو مدلسازی نشان می‌دهد که افزایش زبری سیلاب‌دشت‌ها موجب کاهش سرعت متوسط عمقی و نیز تشدید گردابان تنش برشی مرزی جریان در محل اتصال مقطع اصلی و سیلاب‌دشت‌ها می‌شود. همچنین، بررسی نتایج مدلسازی عددی نشان می‌دهد که نرم‌افزار Flow 3D دارای دقت مناسب برای پیش‌بینی خصوصیات جریان در کانال مرکب با زبری ناهمگن است. ارزیابی عملکرد مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار نیز نشان می‌دهد که مدل آشفتگی RNG، نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی، به دلیل مدلسازی بهتر گردابه‌ها در محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در مدلسازی خصوصیات جریان در کانال مرکب دارای عملکرد بهتری است.

واژه‌های کلیدی

تنش برشی ظاهری، زبری ناهمگن، خصوصیات جریان، نرم‌افزار Flow 3D، هیدرولیک مقاطع مرکب

مقدمه

(Parsaie, 2016). به‌همین دلیل معمولاً پوشیده از گیاهان

و زبرتر از کانال اصلی هستند.

هندسه خاص مقطع مرکب توأم با اختلاف قابل توجه

زبری کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها منجر به اختلاف قابل

توجه سرعت جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها

می‌گردد. این اختلاف سرعت نیز باعث ایجاد لایه‌های

برشی در محل اتصال جریان در مقطع اصلی و

سیلاب‌دشت می‌شود و آشفتگی‌های نسبتاً بزرگی را در

پیش‌بینی دقیق پارامترهای هیدرولیکی جریان در

بسیاری از مسائل مهندسی رودخانه نظیر روندیابی سیل،

تعیین حد بستر و حریم رودخانه با اهمیت است.

رودخانه‌ها معمولاً از یک مقطع اصلی برای انتقال جریان

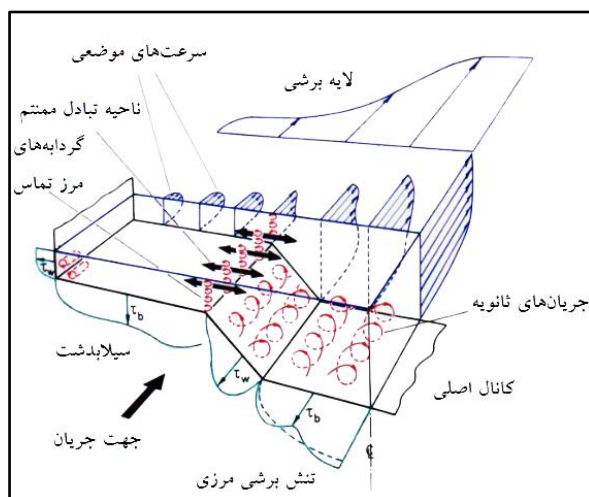
پایه و یک یا دو سیلاب‌دشت تشکیل شده‌اند.

سیلاب‌دشت‌ها در اغلب اوقات خشک‌اند و تنها با جاری

شدن سیل، بخشی از جریان را انتقال می‌دهند

در پنجاه سال اخیر، محققان بسیاری به بررسی پدیده اثر متقابل در مقاطع مرکب پرداخته‌اند. سلین (Sellin, 1964) نخستین کسی بود که با استفاده از پودر آلومینیوم و روش عکسبرداری، شکل‌گیری گردابه‌های مرز تماس را در آزمایشگاه مشاهده کرد.

مرز اتصال ایجاد می‌کند (شکل ۱). این پدیده را اثر متقابل یا، به سخنی دیگر، اندرکنش جریان در مقطع اصلی و مقطع سیلابی می‌نامند. تمایز اصلی مفهوم کانال مرکب با کانال‌های معمولی نیز ناشی از همین پدیده است.



شکل ۱- جزئیات ساختار جریان در مقاطع مرکب مستقیم (Shiono & Knight, 1991)

پرداخته‌اند. در بررسی هیدرولیک مقاطع مرکب با سیلابدشت زبر و ناهمگن، تاکنون تحقیقات زیادی نشده است. فقط چند کار پژوهشی محدود از نایت و حامد (Knight & Thornton *et al.*, 1984)، تورنتون و همکاران (Hamed, 1984)، یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2007)، سان و شیونو (Sun & Shiono, 2009)، مورتا و ویده (Moreta & Martin-Vide, 2010)، یونسی و همکاران (Younesi *et al.*, 2013)، محسنی و همکاران (Mohseni *et al.*, 2013)، حمیدی‌فر و امید (Hamidifar & Omid, 2013) و همکاران (Kordi *et al.*, 2015) دیده شده است. مایرز (Myers, 1978)، بر اساس اندازه‌گیری تنش برشی بستر و جدار و برقراری تعادل نیروها، مقادیر تنش برشی ظاهری روی مرزهای جدایی قائم را محاسبه کرد. شیونو و نایت (Shiono & Knight, 1991) با متوسط‌گیری از معادلات ناویر-استوکس جریان ثانویه در مقاطع مرکب با جریان

پس از سلین (Sellin, 1964)، محققان بسیاری همچون مایرز (Myers, 1978)، نایت و حامد (Knight & Demetriou, 1983)، مایرز و برنان (Myers & Brennan, 1984)، شیونو و نایت (Shiono & Knight, 1991)، تومیناگا و همکاران (Tominaga *et al.*, 1989)، آکرز (Ackers, 1993)، بوسمار و زچ (Bousmar & Zech, 1999)، بابائیان‌کوپایی و همکاران (Babaeyan-Koopaei *et al.*, 2002)، ازبیک و کبه (Ozbek & Cebe, 2003)، آتابای و نایت (Atabay & Knight, 2006)، هات‌هوف و همکاران (Huthoff *et al.*, 2008)، مورتا و ویده (Moreta & Martin-Vide, 2010)، خاتوا و همکاران (Khatua *et al.*, 2012)، تیموری و همکاران (Teymourei *et al.*, 2013)، الخطیب و همکاران (Al-Khatib *et al.*, 2014)، کوردی و همکاران (Kordi *et al.*, 2015) به بررسی هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب

(RSM)، به مدلسازی عددی توزیع سرعت جریان در مقاطع مرکب پرداختند. این محققان از نتایج کانال FCF برای صحت‌سنجی استفاده کردند. کانوی و همکاران (Conway *et al.*, 2012) با استفاده از مدل عددی SSIIM به شبیه‌سازی سه‌بعدی هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب با مسیر مستقیم پرداختند و از داده‌های سری A و C کانال FCF استفاده کردند. نتایج بررسی‌های این محققان نشان می‌دهد که مدل عددی می‌تواند هیدرولیک جریان را در مقاطع مرکب منشوری با مسیر مستقیم و بستر ثابت و متحرک شبیه‌سازی کند. پارسائی و همکاران (Parsaie & Haghiabi, 2015b) دبی جریان را در کانال‌های مرکب با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان (Mohseni *et al.*, 2013) با مدلسازی با استفاده از مدل شبه دوبعدی تانگ و نایت (Tang & Knight, 2009)، به بررسی توزیع سرعت متوسط عمقی جریان در کانال مرکب مستقیم تحت تأثیر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت پرداختند. موهانتا و همکاران (Mohanta *et al.*, 2014) با استفاده از مدل عددی FLUENT به پیش‌بینی جریان در مقاطع مرکب غیرمنشوری پرداختند. ایشان مدل آشفتگی LES را برای مدلسازی به کار گرفتند و از نتایج آزمایشگاهی تحقیق خود برای صحت‌سنجی مدل عددی استفاده کردند.

اکثر تحقیقات در زمینه مقاطع مرکب شامل مطالعات آزمایشگاهی و میدانی است که نتایج قابل قبولی نیز بر اساس آنها ارائه شده است. اما با توجه به بالا بودن هزینه مدل‌های آزمایشگاهی و نیز مشکلات مرتبط با بررسی‌های میدانی به‌ویژه در شرایط سیلابی، روش‌های عددی برای بررسی این پدیده پیچیده مناسب و کاراترین روش‌هاست. در زمینه تأثیر تفاوت زبری میان کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها بر خصوصیات جریان، تحقیقات عددی سه‌بعدی صورت نگرفته از این‌رو در این تحقیق سعی بر این است تا با استفاده از مدلسازی فیزیکی و عددی،

دائمی و یکنواخت را مدلسازی کردند. این روش که با نام SKM شناخته می‌شود، یکی از روش‌های اصلاحی دوبعدی است.

بوسمار و زیک (Bousmar & Zech, 1999) به‌منظور لحاظ کردن اثر انتقال ممنتم میان کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، روش تبادل دبی را ارائه دادند که یک مدل تحلیلی یک‌بعدی در جریان‌های عبوری از مقاطع مرکب است. نایت و حامد (Knight & Hamed, 1984) با آزمایش‌هایی به بررسی تنش برشی ظاهری پرداختند. این دو محقق روابطی را برای محاسبه نیروی برشی ظاهری در مقاطع مرکب منشوری با سیلاب‌دشت‌های زبر ارائه دادند. حمیدی‌فر و امید (Hamidifar & Omid, 2013)، با آزمایش‌هایی در یک کانال مرکب منشوری با مسیر مستقیم، ساختار جریان و آشفتگی را در مقاطع مرکب تحت تأثیر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت بررسی کردند. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت انتقال کانال در حضور پوشش گیاهی، در مقایسه با حالت بدون پوشش گیاهی، تا ۳۱ درصد کمتر است.

علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی و میدانی، مطالعات عددی نیز با کمک گرفتن از رایانه روی مقاطع مرکب صورت گرفته است. رامشواران و نادن (Rameshwaran & Naden, 2003) با استفاده از مدل آشفتگی K- ϵ و کدنویسی اجزای محدود در مقاطع مرکب منشوری با سیلاب‌دشت زبر و همگن، به حل عددی معادلات سه‌بعدی ناویر-استوکس و معادله پیوستگی پرداختند. این محققان از داده‌های سری A کانال FCF برای صحت‌سنجی نتایج مدل عددی بهره جستند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مدل عددی قابلیت پیش‌بینی خصوصیات جریان را در این مقاطع دارد. عثمان و والناتین (Othman & Valentine, 2006) با استفاده از مدل آشفتگی K- ϵ غیرخطی و مدل تنش‌های رینولدز

هر مرحله دیواره و بستر سیلاب‌دشت‌ها با رسوباتی با قطر متوسط ۰/۱۶۵، ۱/۳ و ۱/۷۸ (میلی‌متر) زبر شده است. در بالادست کانال، یک سرریز مثلثی برای اندازه‌گیری دبی جریان ورودی به کانال به کار گرفته شده است.

به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان در آزمایش‌های با عمق نسبی ۰/۱۵ و ۰/۲۵ از یک میکرو مولینه 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. مشخصات آزمایش‌ها در حالات مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است. آزمایش‌ها با یک کد نامگذاری شده‌اند. بدین ترتیب که کد $P - \xi - D_r$ نمایانگر آزمایش‌های کانال منشوری با قطر

نسبی ذرات سیلاب‌دشت به کانال اصلی $\xi = \left(\frac{D_{50fp}}{D_{50mc}} \right)$ و

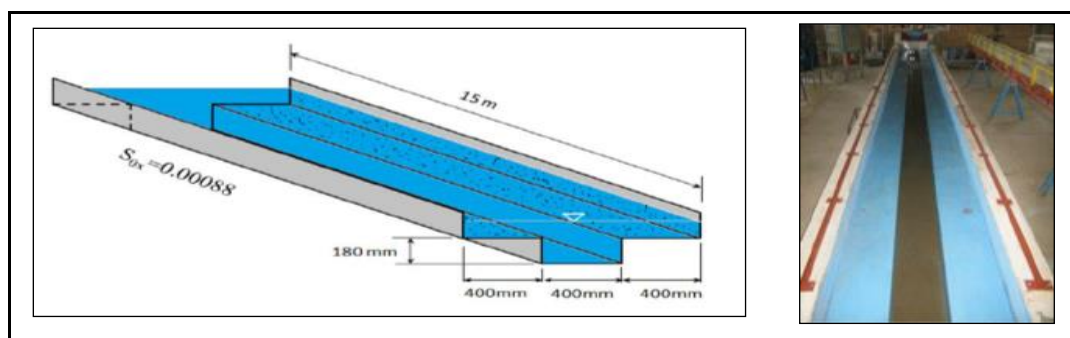
عمق نسبی $D_r = \frac{H-h}{H}$ است.

هیدرولیک جریان در این‌گونه مقاطع شبیه‌سازی شود. مدل‌سازی فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تهران و مدل‌سازی عددی آن با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالاتی محاسباتی (Flow3D) انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها

مدلسازی فیزیکی و مشخصات کانال آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۵ متر در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران اجرا شده است. این کانال، کانال مرکبی با دو سیلاب‌دشت متقارن به عرض ۴۰۰ میلی‌متر با شدت جریان قابل تأمین جهت بازچرخانی در سیستم ۲۵۰ لیتر در ثانیه و شیب طولی ۰/۰۰۰۸۸ است (شکل ۲). برای زبر کردن بستر و دیواره‌های کانال اصلی، از مواد رسوبی با قطر متوسط ۰/۱۶۵ میلی‌متر استفاده در



شکل ۲- نمایی از کانال مرکب منشوری با زبری ناهمگن

جدول ۱- مشخصات آزمایش‌ها

تعداد آزمایش‌ها	زبری نسبی	عمق نسبی	دبی جریان (لیتر بر ثانیه)	کد آزمایش
۳	۱	۰/۳۵، ۰/۲۵، ۰/۱۵	۶۱/۵-۵۰-۴۱	$P - \xi - D_r$
۳	۲	۰/۳۵، ۰/۲۵، ۰/۱۵	۵۷-۴۶/۵-۳۹	
۳	۲/۷۴	۰/۳۵، ۰/۲۵، ۰/۱۵	۵۲-۴۴-۳۷	

پر کاربرد نیز هست، بسته نرم‌افزاری Flow-3D است. این بسته نرم‌افزاری در شرکت Flow Science توسعه داده شده و توانایی بالایی در شبیه‌سازی جریان آب، انتقال

مدلسازی عددی

یکی از معروف‌ترین نرم‌افزارهای تجاری دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) که در مهندسی هیدرولیک

ابعاد $2 \times 2 \times 2$ و $1/4 \times 1/4 \times 1/4$ سانتی‌متر در راستای طولی، عرضی و ارتفاعی با تعداد کل سلول‌ها در شبکه به ترتیب 400000 و 1200000 استفاده شده است (شکل ۳). با توجه به نتایج به دست آمده، شبکه‌بندی میدان جریان با ابعاد $1/4 \times 1/4 \times 1/4$ سانتی‌متر، علیرغم صرف زمان و هزینه بیشتر در آنالیز رایانه‌ای از انطباق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی برخوردار می‌باشد.

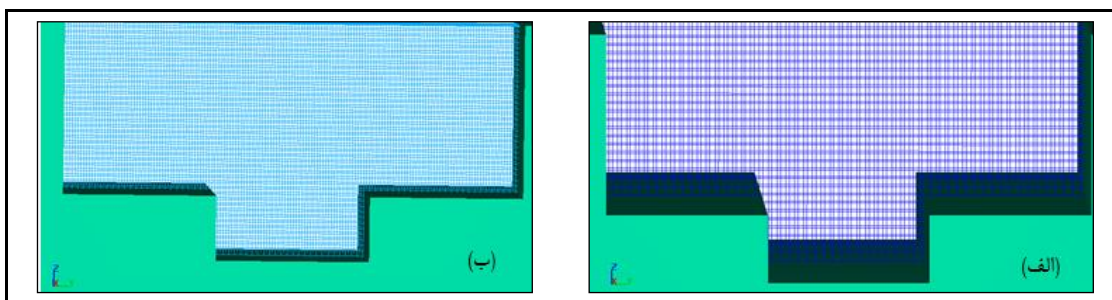
شرایط مرزی اعمال شده برای شبیه‌سازی عددی موضوع مورد مطالعه در مدل Flow 3D به شکل زیر است:

- شرط مرزی بالادست: شرط مرزی دبی جریان^۱
- شرط مرزی پایین دست: شرط مرزی خروجی^۲
- شرط مرزی دیواره برای محدود کردن نواحی سیال با مرز جامد^۳
- شرط مرزی سطح آزاد^۴

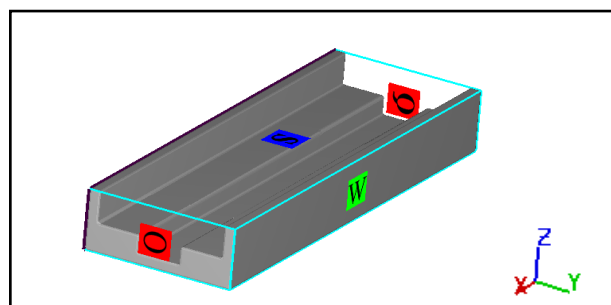
شکل ۴ شرایط مرزی به کار رفته در مدلسازی جریان در کانال مرکب منشوری با زبری ناهمگن را نشان می‌دهد.

رسوب و آبشستگی دارد و مدل مناسبی برای شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی است (Dehdar-Behbahani & Parsaie, 2016). نرم‌افزار Flow-3D از روش عددی حجم محدود مبتنی بر المان استفاده می‌کند (Parsaie & Haghiaibi, 2015b). در این نرم‌افزار، شبیه‌سازی آشفتگی با استفاده از یکی از پنج مدل آشفتگی طول اختلاط پرناتل، یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ ، مدل گروه‌های نرمال شده (RNG) و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ LES صورت می‌گیرد (Parsaie & Haghiaibi, 2015a).

یکی از نکات مهم در شبیه‌سازی عددی، شبکه‌بندی مناسب میدان جریان است. با توجه به رفتار خاص جریان در محل اتصال کانال اصلی به سیلاب‌دشت، به منظور افزایش دقت در نتایج حاصل، باید از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شود. در تحقیق حاضر شبیه‌سازی در ۴ متر از طول کانال و در کل مقطع عرضی اجرا و برای بررسی تأثیر ابعاد شبکه‌بندی بر نتایج، از دو شبکه‌بندی با



شکل ۳- شبکه‌بندی میدان جریان با تعداد کل سلول‌ها در شبکه: الف) 400000 و ب) 1200000



شکل ۴- شرایط مرزی اعمال شده

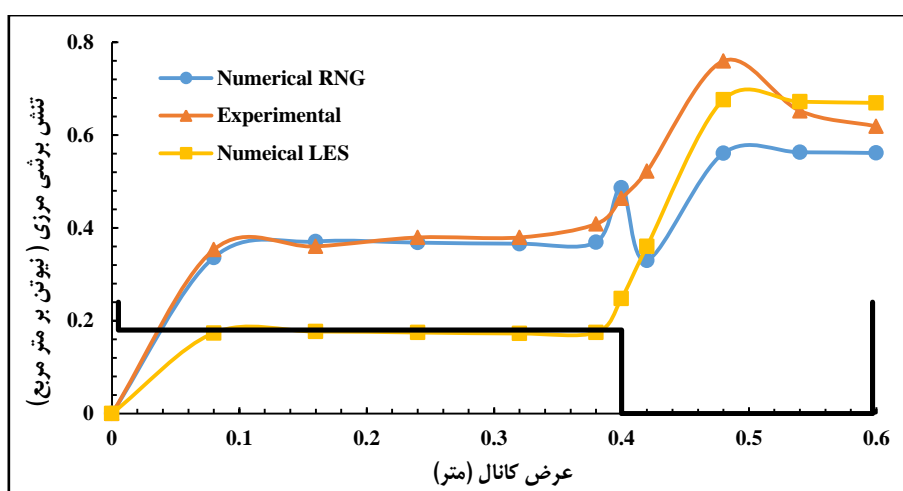
1- Volume Flow Rate
3- Wall

2- Outflow
4- Symmetry

انتخاب مدل آشفتگی

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مدل LES توانایی کمتری در مدلسازی سلول‌های جریان ثانویه دارد و در برآورد تنش برشی مرزی دقت مناسب ندارد در حالی که مدل RNG در مدلسازی این سلول‌ها نتیجه قابل قبولی ارائه داده است. از این‌رو برای ادامه مدلسازی‌های عددی جریان در کانال مرکب با زبری ناهمگن مدل عددی RNG به کار گرفته می‌شود.

انتخاب مدل آشفتگی به طوری که بتواند انطباق بهتری با جریان‌ات عرضی در مقاطع مرکب را نمایش دهد، از مهمترین مراحل شبیه‌سازی عددی جریان در این نوع مقاطع است. دو مدل آشفتگی LES و RNG در نظر گرفته شد و پس از بررسی و مقایسه نتایج به دست آمده از آنها مدل برتر انتخاب گردید (Parsaie et al., 2015).



شکل ۵- مقایسه مدل‌های آشفتگی RNG و LES با نتایج آزمایشگاهی در آزمایش P-1-0.15

مدل آشفتگی RNG

در این مدل یک ترم اضافی در معادله ε وارد می‌شود که دقت محاسباتی را در جریان کرنشی افزایش می‌دهد. این مدل نسبت به مدل استاندارد، در جریان چرخشی، کارایی بیشتری دارد و برخلاف مدل استاندارد، برای تعیین اعداد آشفتگی پرانتل از رابطه تحلیلی استفاده می‌شود. بدین ترتیب این مدل در اعداد رینولدز پایین دقت مناسبی دارد. به همین دلیل از این مدل در تعیین مقادیر آشفتگی جریان، در میدان‌های دارای انحنا یا پیچیدگی هندسی، بیشتر استفاده می‌شود. معادلات حاکم در این مدل به صورت روابط ۱ تا ۳ نشان داده شده است.

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (2)$$

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} k \quad (3)$$

که در آن‌ها،

$\mu_{eff} = \mu$ لزوجت گردابه‌ای مؤثر؛ $\alpha_\varepsilon, \alpha_k =$ مقادیر معکوس عدد پرانتل آشفتگی که در جریان‌هایی با عدد رینولدز بالا تقریباً برابر ۱/۳۶۳ است و G_b و $G_k =$ چشمه معادله ε و K که به ترتیب اثر شناوری و شیب سرعت میانگین جریان را در معادله اعمال می‌کنند. روابط ۱ و ۲ را به ترتیب

$$P \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (1)$$

بر حسب میزان کرنش متوسط در روابط ۱ و ۳ آمده است (Parsaie et al., 2015).

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (4)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}^2} \quad (5)$$

معادله انتقال K و ε می‌نامند. عبارت P اضافه شده به معادله ε در مدل RNG نسبت به مدل حالت استاندارد، باعث اصلاح این معادله در نواحی‌ای شده که میزان کرنش زیاد است. ثابت‌های استفاده شده در رابطه‌های بالا در جدول ۲ آمده است. در رابطه ۳، مقدار η برابر است با $\frac{sk}{\varepsilon}$ و ε بیانگر میزان کرنش متوسط است که رابطه آن

جدول ۲- ضرایب ثابت برای مدل k-ε حالت RNG

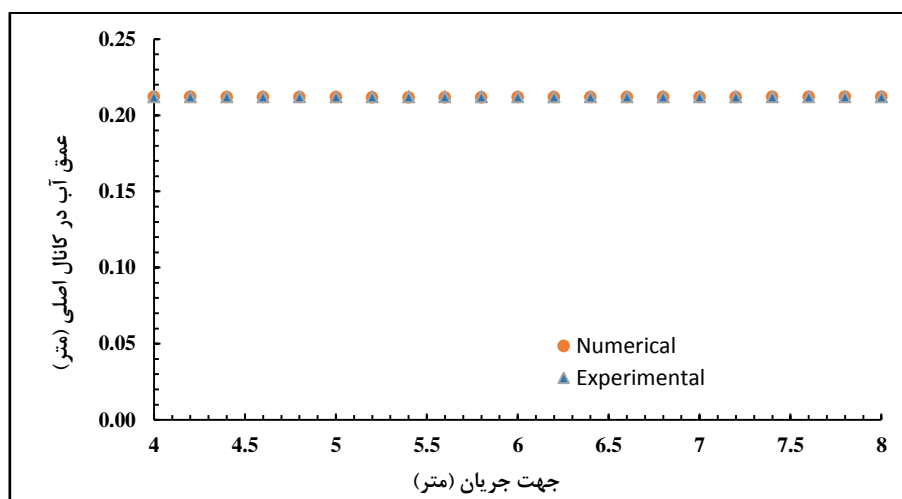
C_μ	$C_{2\varepsilon}$	$C_{1\varepsilon}$	C_v	β	η_0
۰/۰۸۴۵	۱/۴۲	۱/۶۸	۱/۰۰	۰/۰۱۲	۴/۳۸

صحت‌سنجی نتایج

توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی مرزی صحت‌سنجی شده‌اند. مقدار خطای مربع میانگین ریشه‌ای (RMSE) برابر با ۰/۰۰۰۲۱ است که این مقدار کم خطا قابل قبول خواهد بود. بنابراین نتایج حاصل از مدل عددی مورد تأیید قرار می‌گیرد.

واسنجی مدل عددی

مدل عددی با استفاده از پروفیل سطح آب در آزمایش P-1-0.25 واسنجی شده است. در شکل ۶، نتایج پروفیل سطح آب آزمایش P-1-0.15 در مرکز کانال اصلی نشان داده شده است.



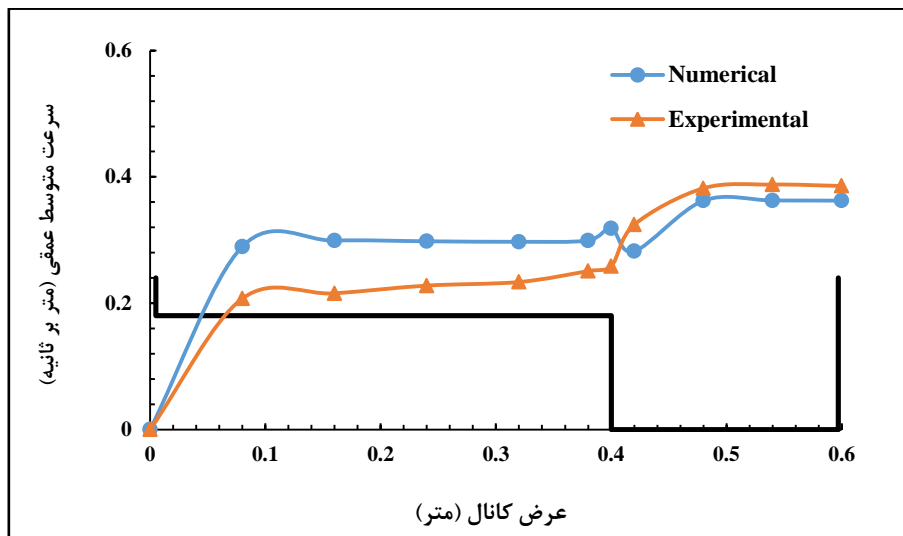
شکل ۶- مقایسه نتایج پروفیل سطح آب حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی در آزمایش P-1-0.15

دید می‌شود، توزیع سرعت متوسط عمقی جریان (سرعت متوسط‌گیری شده در عمق) محاسبه شده با استفاده از مدل عددی با خطای مربع میانگین ریشه‌ای ۰/۰۵۶

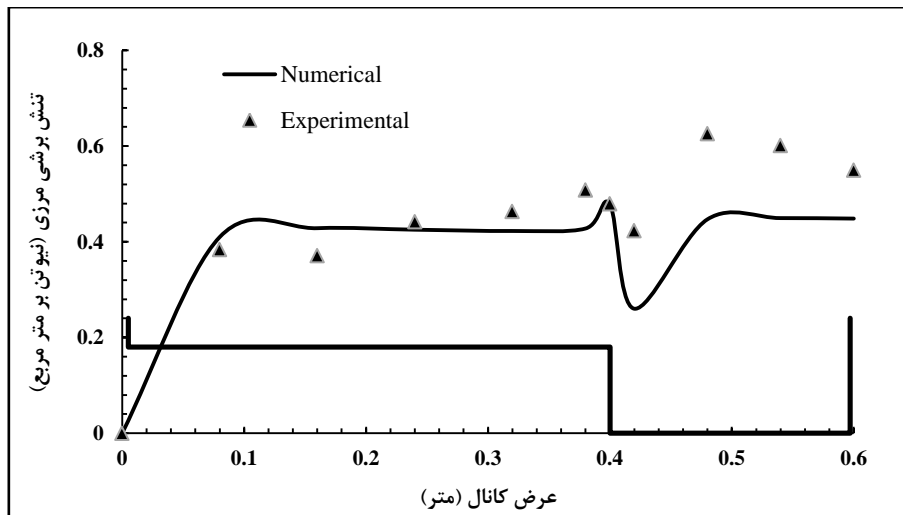
در گام بعدی نتایج مربوط به سرعت متوسط عمقی و تنش برشی جریان نیز صحت‌سنجی و نتایج آن در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۷

مدلسازی عددی همواره حرکت سلول‌های جریان ثانویه به سمت گوشه‌ها بیشتر است تا در مدل آزمایشگاهی آن که این موضوع را می‌توان به کم بودن تعداد نقاط در اندازه‌گیری آزمایشگاهی نسبت داد (Azhdary-Moghadam & Tajnesaie, 2010).

انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و تنها در ناحیه نزدیک به محل اتصال کانال اصلی به سیلابدشت‌ها ($0.42 < y < 0.4$) مقداری خطا وارد محاسبات شده است. که می‌توان آن را ناشی از حرکت جریان‌های عرضی از مقطع اصلی به سمت سیلابدشت‌ها دانست و نیز در



شکل ۷- صحت‌سنجی مربوط به سرعت متوسط عمقی جریان در آزمایش P-1-0.25



شکل ۸- صحت‌سنجی مربوط به توزیع تنش برشی مرزی در آزمایش P-1-0.25

آزمایشگاهی دارد و می‌توان گفت در این مورد نیز صحت مدلسازی عددی و قابلیت دینامیک سیالات محاسباتی تأیید می‌شود. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، هدف از

در شکل ۸ نتایج صحت‌سنجی مربوط به توزیع تنش برشی مرزی ارائه شده است. نتایج حاصل از مدل عددی با RMSE برابر با ۰/۱ همخوانی نسبتاً خوبی با نتایج

$$K_s = (8.25 \sqrt{g n})^6 \quad (6)$$

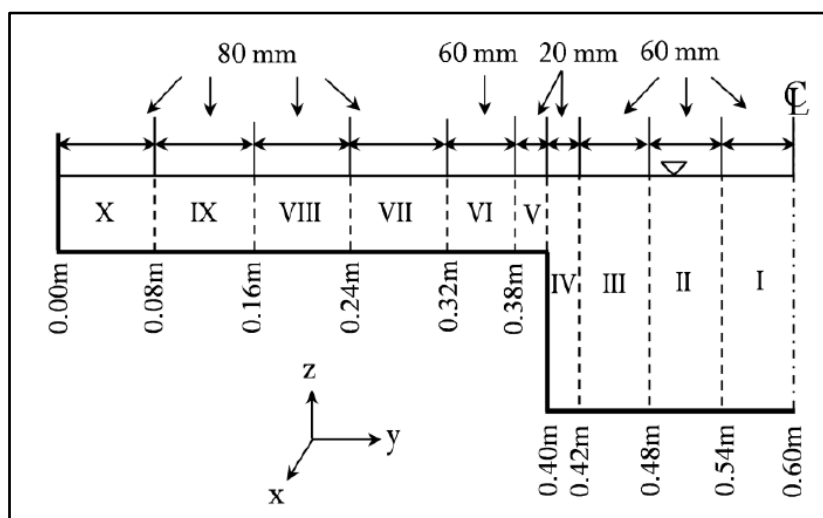
که در آن،

K_s = ارتفاع معادل ماسه برای ذرات زبری به کار برده شده بر حسب متر؛ g = شتاب ثقل زمین بر حسب متر بر مجذور ثانیه؛ و n = ضریب زبری مانینگ.

اثر افزایش زبری بر توزیع سرعت

با توجه به شکل ۹ مقطع عرضی کانال مرکب به زیربخش‌هایی تقسیم شده است که مقادیر سرعت موضعی جریان (مؤلفه طولی سرعت) در این نقاط برداشت شده است.

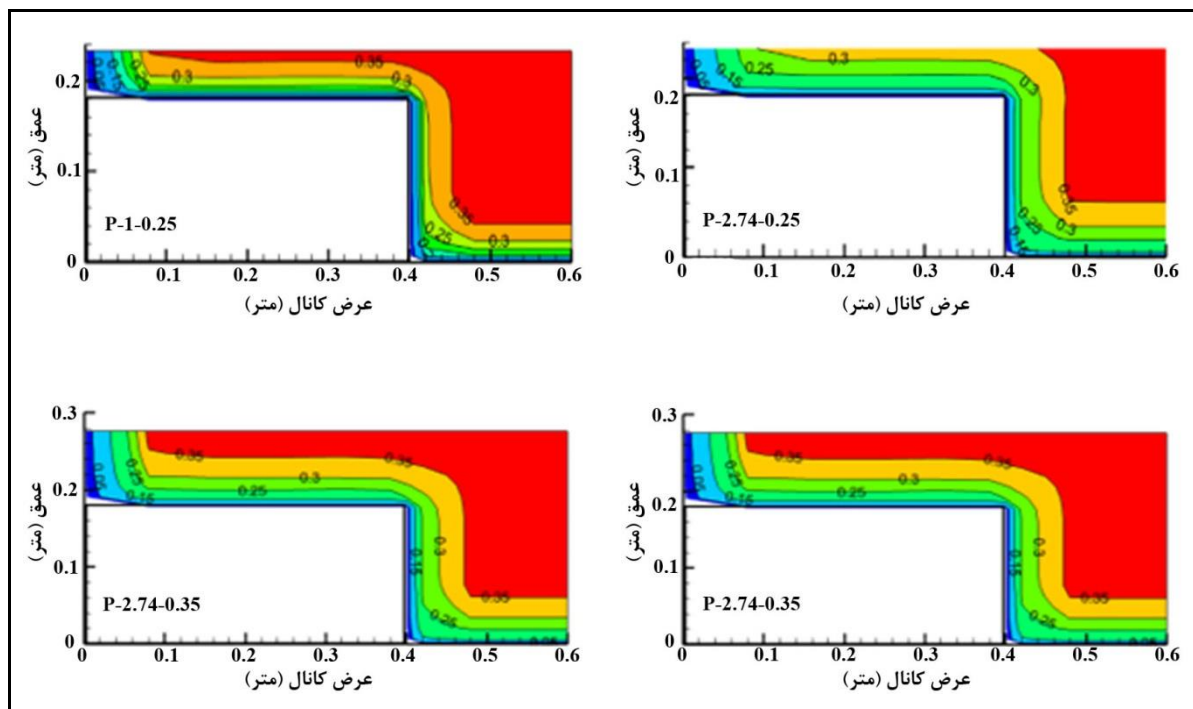
تحقیق حاضر بررسی تأثیر زبری سیلاب‌دشت‌ها بر هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب منشوری است. از این رو پس از صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل عددی برای زبری همگن، در این بخش اثر افزایش زبری سیلاب‌دشت‌ها بر نتایج بررسی خواهد شد. برای در نظر گرفتن اثری زبری بستر و دیواره‌ها، باید ضریب زبری آنها در محاسبات وارد شود. نرم‌افزار Flow 3D مقدار ضریب زبری را بر حسب ارتفاع معادل ماسه نیکورادزه دریافت می‌کند (رابطه ۶). در تحقیق حاضر سه ارتفاع معادل زبری ۰/۰۰۲۱۹، ۰/۰۰۴۳۸ و ۰/۰۰۶ بر حسب متر در نظر گرفته شده است.



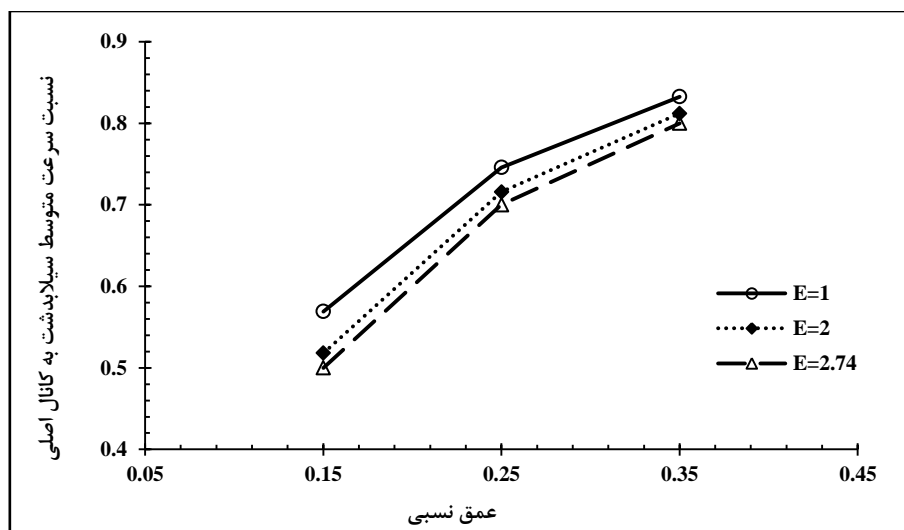
شکل ۹- مقاطع عرضی برداشت سرعت جریان در یک نیمه از کانال مرکب

در شکل ۱۱ نسبت سرعت متوسط جریان در سیلاب‌دشت به کانال اصلی (U_{fp}/U_{mc}) ارائه شده است. برای زبری نسبی ثابت (ξ)، با افزایش عمق نسبی (D_r) بر مقدار نسبت سرعت متوسط جریان در سیلاب‌دشت به کانال اصلی افزوده می‌گردد. همچنین در یک عمق نسبی ثابت، با افزایش زبری از نسبت سرعت جریان در متوسط سیلاب‌دشت به مقطع اصلی کاسته می‌شود.

توزیع مؤلفه طولی سرعت جریان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در اینجا دیده می‌شود که در یک عمق نسبی ثابت با افزایش زبری از مقدار مؤلفه طولی سرعت جریان کاسته می‌شود. این مطلب را یانگ و همکاران (Yang et al., 2007) نیز تأکید کرده‌اند. همچنین، ماکزیمم سرعت جریان در کانال اصلی در مرکز و مقدار ماکزیمم سرعت جریان در سیلاب‌دشت‌ها در سطح آب اتفاق می‌افتد.



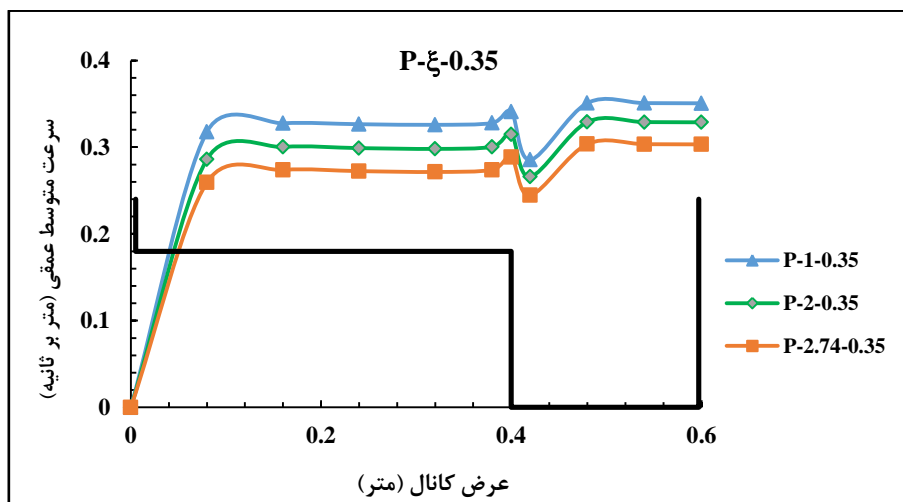
شکل ۱۰- نتایج مدل عددی توزیع سرعت جریان در کانال مرکب



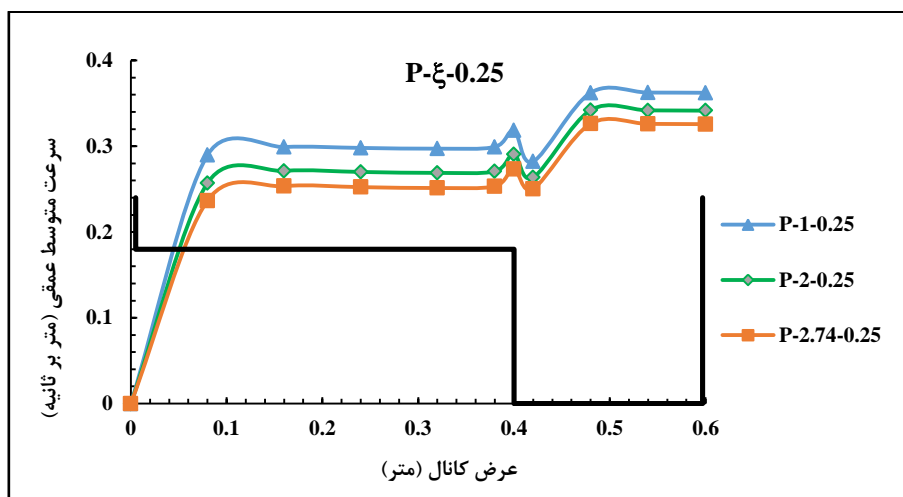
شکل ۱۱- نسبت سرعت متوسط سیلابدشت به کانال اصلی P- ξ -D_r

اصلی به سیلابدشت‌ها و نیز در نزدیکی دیواره سیلابدشت چشمگیرتر است. گرادیان شدید سرعت در محل اتصال کانال اصلی به سیلابدشت‌ها نیز کاملاً مشهود است.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ می‌بینیم، با افزایش زبری سیلابدشت‌ها در اعماق نسبی ۰/۲۵ و ۰/۳۵ از میزان سرعت متوسط عمقی نیز کاسته می‌شود. مقدار کاهش سرعت جریان در نزدیکی محل اتصال کانال

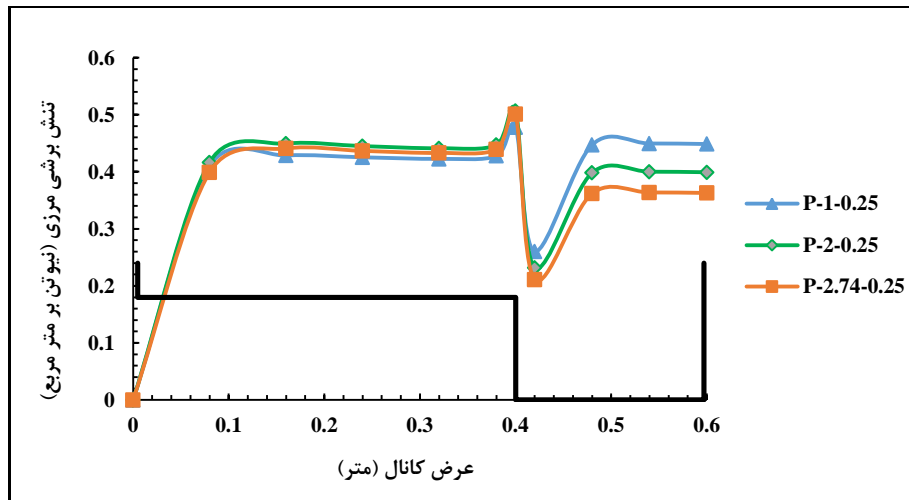


شکل ۱۲- مقایسه نتایج مدلسازی عددی سرعت متوسط عمقی جریان در عمق نسبی $+35\%$ با زبری های مختلف

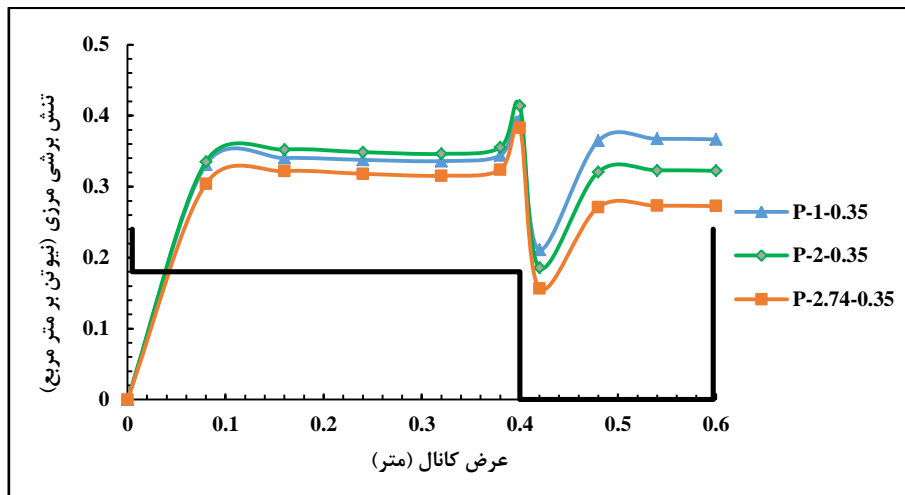


شکل ۱۳- مقایسه نتایج مدلسازی عددی سرعت متوسط عمقی جریان در عمق نسبی $+25\%$ با زبری های مختلف اثر افزایش زبری بر تنش برشی مرزی

با توجه به شکل های ۱۴ و ۱۵، با افزایش زبری سیلابدشت ها مقدار تنش برشی مرزی افزایش می یابد. همچنین در مرز تماس کانال اصلی و سیلابدشت ها گرادیان تنش برشی شدیدتر است.



شکل ۱۴- مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی تنش برشی مرزی در آزمایش P-ξ-0.25

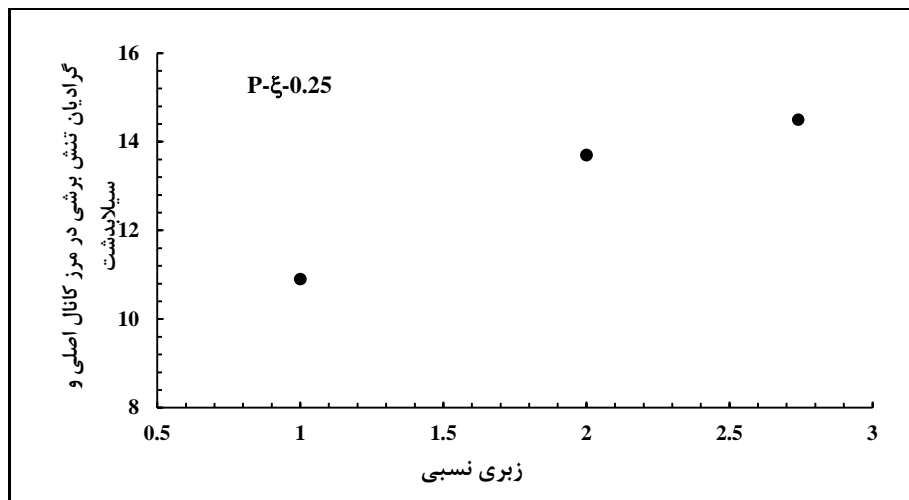


شکل ۱۵- مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی تنش برشی مرزی در آزمایش P-ξ-0.35

اثر افزایش زبری بر درصد دبی تقسیم شده

درصد دبی تقسیم شده از مجموع سرعت متوسط عمقی جریان در کانال اصلی و سیلابدشت‌ها محاسبه شده است. در شکل ۱۶ گرادیان تنش برشی در محل اتصال کانال اصلی به سیلابدشت‌ها به‌ازای زبری‌های مختلف نشان داده شده است. نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که با افزایش

زبری نسبی، گرادیان تنش برشی مرزی در محل برخورد کانال اصلی به سیلابدشت‌ها افزایش می‌یابد. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، با افزایش زبری نسبی، دبی انتقالی سیلابدشت‌ها کاهش می‌یابد که این موضوع ناشی از افزایش مقاومت جریان روی سیلابدشت‌هاست. بررسی‌های تانگ و نایت (Tang & Knight, 2009) نیز مؤید این امر است.



شکل ۱۶- مدلسازی عددی گرادیان تنش برشی مرزی در محل اتصال کانال اصلی و سیلابدشت به ازای زبری های مختلف

جدول ۳- تعیین درصد دبی تقسیم شده بین مقطع اصلی و سیلابدشت

نام آزمایش	نسبت دبی انتقالی کانال اصلی به دبی کل به دست آمده از مدل عددی (درصد)	نسبت دبی انتقالی سیلابدشت به دبی کلبه به دست آمده از مدل عددی (درصد)
P-1-0.15	۸۵	۱۵
P-2-0.15	۸۶	۱۴
P-2.74-0.15	۸۶/۳	۱۳/۷
P-1-0.25	۷۲	۲۷/۹
P-2-0.25	۷۳	۲۷
P-2.74-0.25	۷۳/۴	۲۶/۶
P-1-0.35	۶۲	۳۸
P-2-0.35	۶۲/۶	۳۷/۴
P-2.74-0.35	۶۲/۹	۳۷/۱

نتیجه گیری

- مدل آشفتگی RNG قادر به مدلسازی جریان ثانویه است.
 - شرایط مرزی مورد استفاده به درستی انتخاب شده است.
 - با افزایش زبری سیلابدشتها، سرعت متوسط عمقی جریان کاهش می یابد.
 - با افزایش زبری سیلابدشتها، گرادیان تنش برشی مرزی تشدید می شود.
 - با افزایش زبری نسبی از مقدار دبی انتقالی سیلابدشتها کاسته می شود.

در این تحقیق، هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب منشوری با زبری ناهمگن با استفاده از مدلسازی فیزیکی و عددی و با استفاده از مدل Flow 3D شبیه سازی شد. می توان نتایج حاصل از این تحقیق را این گونه جمع بندی کرد:
 - انطباق نتایج حاصل از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی قابل قبول است و مدل Flow 3D می تواند هیدرولیک جریان را در مقاطع مرکب با زبری ناهمگن مدلسازی کند.

مراجع

- Ackers, P. 1993. Stage-discharge functions for two stage channels: The impact of new research. *J. Inst. Water Environ. Manage.* 7(1): 52-59.
- Al-Khatib, I. A., Abaza, Kh. A. and Fkhidah, I. A. 2014. Prediction of zonal and total discharges in smooth straight prismatic compound channels using regression modeling. *Flow Meas. Instrum.* 38, 40-48.
- Atabay, S. and Knight, D. 2006. 1-D modelling of conveyance, boundary shear and sediment transport in overbank flow. *J. Hydraul. Res.* 44(6): 739-754.
- Azhdary-Moghadam, M. and Tajnesaie, M. 2010. Numerical modeling of secondary current cells in trapezoidal channels with uniform roughness. *J. Model. Eng.* 8(20): 57-70. (in Persian)
- Babaeyan-Koopaei, K., Ervine, D. A., Carling, P. A. and Cao, Z. 2002. Velocity and turbulence measurements for two overbank flow events in River Severn. *J. Hydraul. Eng.* 128(10): 891-900.
- Bousmar, D. and Zech, Y. 1999. Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. *J. Hydraul. Eng.* 125(7): 696-706.
- Conway, P., O'Sullivan, J. J. and Lambert, M. F. 2012. Stage-discharge prediction in straight compound channels using 3D numerical models. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management.* 166(1): 3-15. doi:10.1680/wama.11.00015
- Dehdar-Behbahani, S. and Parsaie, A. 2016. Numerical modeling of flow pattern in dam spillway's guide wall. Case study: Balaroud dam, Iran. *Alexandria Eng. J.* 55(1): 467-473. doi:10.1016/j.aej.2016.01.006.
- Hamidifar, H. and Omid, M. H. 2013. 3D simulation of flow in open compound channels by Flow 3D model. *Proceeding of the 11th Iranian Hydraulic Conference.* Urmia. Iran. (in Persian)
- Huthoff, F. A. C., Roos, P., Augustijn, D. and Hulscher, S. 2008. Interacting divided channel method for compound channel flow. *J. Hydraul. Eng.* 134(8): 1158-1165.
- Khatua, K., Patra, K. C. and Mohanty, P. K. 2012. Stage-discharge prediction for straight and smooth compound channels with wide floodplains. *J. Hydraul. Eng.* 138(1): 93-99.
- Knight, D. W. and Demetriou, J. D. 1983. Flood plain and main channel flow interaction. *J. Hydraul. Eng.* 109(8): 1073-1092.
- Knight, D. W. and Hamed, M. E. 1984. Boundary shear in symmetrical compound channels. *J. Hydraul. Eng. ASCE.* 110(10): 1412-1429.
- Kordi, H., Amini, R., Zahiri, A. and Kordi, E. 2015. Improved Shiono and Knight method for overflow modeling. *J. Hydrol. Eng.* doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001239.
- Mohanta, A., Naik, B., Patra, K. C. and Khatua, K. K. 2014. Experimental and numerical study of flow in prismatic and non-prismatic section of a converging compound channel. *Int. J. Civil Eng. Res.* 5(3): 203-210.
- Mohseni, M., Mohammad-Vali-Samani, J. and Ayoubzadeh, S. A. 2013. Distribution of velocity in open compound channels with vegetated floodplains. *J. Hydraul.* 8(3): 63-75. (in Persian)
- Moreta, P. J. and Martin-Vide, J. P. 2010. Apparent friction coefficient in straight compound channels. *J. Hydraul. Res.* 48(2): 169-177.
- Myers, W. 1978. Momentum transfer in a compound channel. *J. Hydraul. Res.* 16(2): 139-150.
- Myers, W. and Brennan, E. 1989. Flow resistance in compound channels. *J. Hydraul. Res.* 28(2): 141-155.

- Othman, F. and Valentine, E. M. 2006. Numerical modelling of the velocity distribution in a compound channel. *J. Hydrol. Hydromech.* 54(3): 269-279.
- Ozbek, T. and Cebe, K. 2003. Comparison of methods for predicting discharge in straight compound channels using apparent shear stress concepts. *Turk. J. Eng. Environ. Sci.* 28(2): 101-109.
- Parsaie, A. 2016. Analyzing the distribution of momentum and energy coefficients in compound open channel. *Model. Earth Syst. Environ.* 2, 1-5. doi:10.1007/s40808-015-0054-x.
- Parsaie, A. and Haghiabi, A. H. 2015a. Computational modeling of pollution transmission in rivers. *Appl. Water Sci.* doi:10.1007/s13201-015-0319-6.
- Parsaie, A. and Haghiabi, A. H. 2015 b. The effect of predicting discharge coefficient by neural network on increasing the numerical modeling accuracy of flow over side weir. *Water Resour. Manage.* 29, 973-985. doi:10.1007/s11269-014-0827-4.
- Parsaie, A., Haghiabi, A. H. and Moradinejad, A. 2015. CFD modeling of flow pattern in spillway's approach channel Sustainable. *Water Resour. Manage.* 1, 245-251. doi:10.1007/s40899-015-0020-9.
- Rameshwaran, P. and Naden, P. 2003. Three-dimensional numerical simulation of compound channel flows. *J. Hydraul. Eng.* 129:(8), 645-652.
- Sellin, R. H. J. 1964. A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain. *La Houille Blanche.* 19(7): 793-801.
- Shiono, K. and Knight, D. W. 1991. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *J. Fluid Mech.* 222, 617-646.
- Tang, X. and Knight, D. W. 2009. Analytical models for velocity distributions in open channel flows. *J. Hydraul. Res.* 47(4): 418-428.
- Teymourei, E., Barani, G. A., Janfeshan, H. and Dehghanie, A. A. 2013. Coefficient estimate flood flow channels comprising secondary. *J. Basic Appl. Sci. Res.* 3(2s): 639-646.
- Thornton, C. I., Abt, S. R., Morris, C. E. and Fischenich, J. C. 2000. Calculating shear stress at channel-overbank interfaces in straight channels with vegetated floodplains. *J. Hydraul. Eng.* 126(12): 929-936.
- Tominaga, A., Nezu, L., Ezaki, K. and Nekagawa, H. 1989. Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows. *J. Hydraul. Res.* 27(1): 149-173.
- Yang, K., Cao, S. and Knight, D. W. 2007. Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains. *J. Hydraul. Eng.* 133(2): 148-159.
- 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.



Physical and Numerical Modeling of Flow Properties in Prismatic Compound Open Channel with Heterogeneous Roughness

Sh.Najafian, H. Younesi, A. Parsaei* and H. Torabi-Poudeh

* Corresponding Author: Ph. D. Student of Water Engineering Department, Agricultural Faculty of Lorestan University, Lorestan, Iran. Email: abbas_parsaei@yahoo.com

Received: 11 February 2016, Accepted: 10 August 2016

Modeling of flow through the compound open channel is one of the main problems in the field of hydraulic engineering. One of the main parameter related to the flow properties in the compound open channel is Shear Stress. The shear stress is because of difference of velocities between the main channel and floodplains. The Shear Stress causes of turbulence and vortex creation on the border of main channel and floodplains. The difference between the roughness of main channel and floodplains intensities the shear stress in the border zone. In this investigation using the physical and numerical modeling the flow properties in the heterogeneous roughness prismatic compound open channel was studied. The study was carried out in the hydraulic laboratory of Tehran University and numerical modeling was conducted using the Flow 3D as famous computational fluid dynamic (CFD) tool. The results indicated that the Flow 3D software has high ability for modeling the flow characteristics in heterogeneous roughness prismatic compound open channel and the RNG turbulence mode is suitable for modeling the vortex on the border of both sections.

Keywords: Compound Open Channel, Flow 3D, Heterogeneous Roughness, Shear Stress.