

## مدل سه بعدی کانال‌های انتقال آب مرکب با بستر صلب و آبرفتی برای تعیین توزیع سرعت و رابطه دبی - اشل

فرزاد درویش مجنی<sup>۱</sup>، سعیدرضا خدائشناس<sup>۲\*</sup> و عبدالرضا ظهیری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۲۳

### چکیده

تاکنون تحقیقات زیادی برای تعیین توزیع عرضی سرعت جریان و نیز محاسبه دبی در مقاطع مرکب در حالت بستر صلب انجام شده است. این در حالی است که مقاطع مرکب رودخانه‌ای دارای بستر آبرفتی بوده و از نظر هیدرولیکی تفاوت زیادی با کانال‌های مرکب با بستر صلب دارند. در حالت بستر رسوبی به دلیل اثر متقابل جریان و رسوبات کف، فرم بستر به شکل موج‌دار در می‌آید و باعث تغییر ضریب زبری آبراهه می‌شود. همچنین الگوی جریان در مقاطع مرکب سه‌بعدی بوده و بهتر است از مدل‌های ریاضی سه‌بعدی برای حل مسایل هیدرولیکی این مقاطع استفاده شود. در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، تغییرات دویعدی و سه‌بعدی سرعت جریان در مقاطع مرکب مستقیم با بستر صلب و آبرفتی شبیه‌سازی شده و با داده‌های آزمایشگاهی از موسسه تحقیقات والینگفورد<sup>۴</sup> مقایسه شده است. برای این منظور از داده‌های توزیع عرضی سرعت و روابط دبی - اشل دو کانال بزرگ مقیاس دوزنقه‌ای شامل FCF-A با بستر بتنی و FCF-C با بستر ماسه‌ای استفاده شد. نتایج نشان داد که منحنی‌های هم سرعت و نیز توزیع عرضی سرعت جریان به دست آمده از نرم‌افزار FLOW-3D مطابقت مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی در هر دو بخش مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی دارند. همچنین نتایج این مقایسه‌ها نشان داد که مقادیر دبی کل جریان به دست آمده از نرم‌افزار FLOW-3D مطابقت بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد به طوری که حداکثر و میانگین خطای نسبی این نتایج برای کانال با بستر صلب به ترتیب ۵/۵ و ۲/۷ درصد و برای کانال با بستر آبرفتی به ترتیب ۶ و ۳/۸ درصد بدست آمد. در نهایت نتایج به دست آمده از نرم‌افزار FLOW-3D با نتایج روش یک‌بعدی تجزیه قایم مقطع مرکب، روش مقطع واحد، نرم‌افزار HEC-RAS، روش کوهرنس<sup>۵</sup>، روش تقسیم مقطع وزنی، مدل تبادل دبی و نیز نتایج مدل ریاضی مقایسه شدند. این مقایسه کارایی و عملکرد مناسب‌تر نرم‌افزار FLOW-3D در شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در مقاطع مرکب با بستر صلب و آبرفتی را تایید نمود.

**واژه‌های کلیدی:** بستر رسوبی، توزیع عرضی سرعت، مقاطع مرکب، نرم‌افزار FLOW-3D، واسنجی

### مقدمه

به صورت شماتیک نشان داده شده‌اند. به دلیل پیچیدگی جریان در این شرایط، معمولاً مدل‌های ریاضی یک‌بعدی قابلیت حل مباحث مقاطع مرکب را نداشته و مدل‌های دویعدی و سه‌بعدی به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرند (Conway et al., 2012). نکته‌ای که مهم است این است که وضعیت نشان داده شده در شکل ۱ مربوط به مقاطع مرکب با بستر صلب است در حالی که رودخانه‌ها دارای بستر آبرفتی بوده و به همین دلیل وضعیت هیدرولیکی آن‌ها از پیچیدگی بیش‌تری برخوردار است.

در روش‌های معمول محاسبه دبی و سرعت متوسط جریان در مقاطع مرکب، از تجزیه قایم استفاده می‌شود. در این روش ابتدا مجرای اصلی از دشت‌های سیلابی جدا شده و سپس دبی جریان در هر کدام از این بخش‌ها به صورت مجزا و به کمک معادله مانینگ محاسبه می‌شود. دبی کل جریان از مجموع دبی‌های مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی بدست می‌آید (Chow., 1959; Ackers 1992).

هیدرولیک جریان در کانال‌های با مقطع مرکب به دلیل اختلاف سرعت در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی پیچیده بوده و اصولاً باید به صورت سه‌بعدی مورد بررسی قرار گیرد. در محل اتصال مقطع اصلی به دشت‌های سیلابی، گردابه‌ها تشکیل می‌شود که انرژی جنبشی جریان در مقطع اصلی را تا حدود زیادی کاهش می‌دهد. در شکل ۱، فرآیندها و الگوهای سه‌بعدی جریان در مقاطع مرکب

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد

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

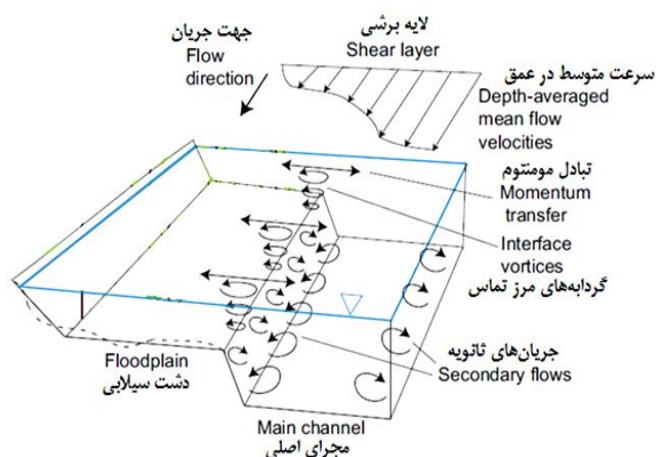
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

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

4- Wallingford

5- Coherence

این روش تاکنون به دفعات فراوان توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته و خطای زیاد آن گزارش شده است (Ackers., 1992; Lambert et al., 1999).



شکل ۱- هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب با بستر صلب (Shino and night., 1991)

است که رودخانه‌ها به عنوان مهم‌ترین مقطع مرکب طبیعی دارای بستر آبرفتی بوده و به دلیل اثر متقابل جریان و رسوب بستر رودخانه، فرآیندهای متفاوتی اتفاق افتاده که برآیند این فرآیندها، افزایش قابل ملاحظه ضریب زبری مانینگ بستر آبراهه است. افزایش ضریب زبری بستر، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در دبی جریان و رابطه دبی-اشل آبراهه خواهد داشت. از طرف دیگر، با توجه به توسعه سخت‌افزاری و نرم-افزاری رایانه‌ها، امروزه کاربرد مدل‌های ریاضی سه‌بعدی در حل موضوعات مختلف مهندسی به طور گسترده‌ای در حال افزایش است. اگرچه پیشرفت‌های زیادی در محاسبات دبی جریان در مقاطع مرکب با بستر صلب حاصل شده است، اما این مطالعات برای مقاطع مرکب آبرفتی بسیار محدود است. در مجاری با بستر آبرفتی به دلیل تشکیل فرم بستر (شکنج‌ها و تلماسه‌ها)، مقاومت بستر افزایش یافته و رابطه دبی-اشل را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین برای استخراج این رابطه، باید ضریب زبری بستر به صورت مناسبی محاسبه شود. محاسبه ضریب مقاومت در این حالت پیچیده بوده و به پارامترهای زیادی از قبیل شرایط هیدرولیکی جریان (عمق، سرعت و شیب انرژی)، مشخصات فیزیکی رسوب (دانه‌بندی)، نوع انتقال رسوب (بار معلق و بستر) و ابعاد فرم بستر وابسته است (White et al., 1980; Van Rijn., 1984).

کاسل و همکاران با بررسی داده‌های آزمایشگاهی و صحرایی مقاطع مرکب با بستر رسوبی کانال کوچک دانشگاه اولستر<sup>۱</sup> (UU)، کانال بزرگ والینگفورد<sup>۲</sup> (FCF) و رودخانه مین در انگلستان، روابط دبی-اشل را به کمک روش یک‌بعدی تجزیه وزنی لامبرت و میرز

از زمانی که سلین (۱۹۶۴) برای اولین بار، وجود گردابه‌هایی در سطح تماس بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی را به صورت آزمایشگاهی در مقاطع مرکب مشاهده نمود، بیش از ۵۰ سال می‌گذرد (Sellin., 1964). این مسئله، فرض چاو (۱۹۵۹) مبنی بر ناچیز بودن تنش برشی ایجاد شده در مرز تماس مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی در رودخانه‌های با مقطع مرکب نسبت به تنش برشی بستر را تا حدود زیادی نقض نمود (Chow., 1959). بعد از مطالعه سلین (۱۹۶۴)، موضوع هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب مورد توجه محققین بسیار زیادی قرار گرفت (Sellin., 1964). با انجام آزمایش‌های وسیع و گسترده در این زمینه، بسیاری از جنبه‌های پیچیده این مقاطع مورد بحث و بررسی قرار گرفت و روابط زیادی برای محاسبه دقیق رابطه دبی-اشل در مقاطع مرکب ارائه شد. بیش‌ترین تمرکز این مطالعات بر ارایه روش‌های یک‌بعدی و شبه دویبعدی برای محاسبه دبی جریان در مقاطع مرکب با بستر صلب بوده است. در این زمینه از میان روش‌های یک‌بعدی، روش‌های آکرز (۱۹۹۲)، لامبرت و مایرز (۱۹۹۸)، بوسمار و زک (۱۹۹۹)، آتابای و نایت (۲۰۰۶)، هاتوف و همکاران (۲۰۰۸) و کاتوا و همکاران (۲۰۱۱) و از میان روش‌های دویبعدی نیز مدل شیونو و نایت (۱۹۹۱)، وارک و همکاران (۱۹۹۴)، لامبرت و سلین (۱۹۹۴)، اروین و همکاران (۲۰۰۰)، مک‌گاهی و همکاران (۲۰۰۶) و هو و همکاران (۲۰۱۰) قابل ذکر می‌باشند (سکین و همکاران ۲۰۰۹، ظهیری و عظمت الله ۲۰۱۴) (Shiono and Knight., 1991; Ackers., 1992; Lambert and Sellin., 1994; Wark et al., 1994; Lambert and Myers., 1998; Bousmar and Zech., 1999; Ervine et al., 2000; Atabay and Knight., 2006; Mc Gahey et al., 2006; Huthoff et al., 2008; Seckin et al., 2009; Hu et al., 2010; Khutuaet al., 2011; Zahiri and Azamatullah., 2014).

1- Ulster University

2- Wallingford

زبری مانینگ (یا ارتفاع زبری) است، در حالی که خروجی‌ها مدل به صورت توزیع دوبعدی و سه‌بعدی سرعت بدست آمده‌اند.

## مواد و روش‌ها

### داده‌های آزمایشگاهی

برای انجام این تحقیق، از داده‌های هیدرولیکی دو نوع کانال آزمایشگاهی مستقیم با مقطع مرکب استفاده شد. هر دو کانال از مجموعه کانال‌های موسسه تحقیقات هیدرولیک والینگفورد (FCF) انتخاب شدند که از دقت و اعتبار بسیار بالایی در دنیا برخوردار می‌باشند (Knight and Sellin., 1987; Shiono and Knight., 1991). مقطع مرکب اول از فاز A (بستر صلب) و مقطع مرکب دوم از فاز C (بستر آبرفتی) می‌باشند.

کانال مرکب FCF-A یک کانال دوزنقه‌ای از جنس بتن صاف است که طول آن حدود ۵۰ متر، عرض کل آن ۶/۳ متر است. مجرای اصلی آن دارای عرض کف ۱/۵ متر، ارتفاع ۰/۱۵ متر و شیب‌های جانبی ۱:۱ می‌باشد. دشت‌های سیلابی آن نیز دارای عرض ۲/۲۵ متر و شیب‌های جانبی ۱:۱ می‌باشد. ضریب زبری مانینگ مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی حدود ۰/۰۱۱ و شیب طولی این کانال ۰/۰۰۱۰۲۷ است. حداکثر دبی جریان در این کانال حدود ۱/۱ مترمکعب بر ثانیه است (Knight and Shiono., 1990).

کانال مرکب FCF-C یک کانال دوزنقه‌ای به طول ۴۰ متر، عرض ۸ متر و شیب طولی ۰/۰۰۱۸۳۴ می‌باشد. مجرای اصلی این کانال به دوزنقه‌ای به عرض کف ۱/۶ متر، ارتفاع ۰/۲ متر و شیب جانبی ۱:۱ می‌باشد. کف مجرای اصلی از رسوبات ماسه‌ای به قطر متوسط ۰/۸۳۵ میلی‌متر پوشیده شده است. دشت‌های سیلابی این کانال به عرض ۳ متر و شیب جانبی ۱:۱ می‌باشند (Knight et al., 1999). حداکثر دبی جریان در این کانال حدود ۰/۷۵ مترمکعب بر ثانیه است. نمایی از هندسه مقطع عرضی این کانال‌ها در شکل ۲ و خلاصه‌ای از شرایط هیدرولیکی و هندسی آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

### مدل‌سازی ریاضی جریان در مقاطع مرکب

مدل ریاضی سه‌بعدی FLOW-3D ابزار قدرتمندی در شبیه‌سازی هیدرودینامیکی بسیاری از پدیده‌های مرتبط با مایعات و گازها است. این نرم‌افزار توانایی بالایی در شبیه‌سازی جریان در رودخانه‌ها، انتقال رسوب و نیز پدیده آبستگي داشته است (FLOW-3D user manual (version 9.3), 2008, Flow Science Inc).

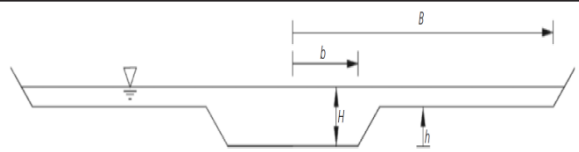
### شبکه‌بندی میدان حل و شرایط مرزی در نرم‌افزار FLOW-3D

از نکات مهم در مدل‌سازی ریاضی پدیده‌ها، شبکه‌بندی مناسب

(۱۹۹۸) برآورد نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که روش فان-راین<sup>۱</sup> (۱۹۸۴) در تخمین ضریب زبری مانینگ مقطع اصلی کانال FCF کارایی خوبی دارد، اما در کانال UU موفق نیست. همچنین مشخص شد که روش تجزیه وزنی دارای قابلیت مناسبی در تعیین دبی کل جریان در هر سه مقطع مرکب آزمایشگاهی و صحرایی است (Cassells et al., 2001). فیشر آنتز و همکاران با استفاده از مدل ریاضی سه‌بعدی SSIIM به همراه مدل آشفتگی k-ε، اثر پوشش گیاهی بر هیدرولیک جریان در دشت‌های سیلابی را شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها نتایج مدل ریاضی خود را با داده‌های آزمایشگاهی ۳ کانال مرکب مستقیم با هندسه و تراکم پوشش گیاهی مختلف مقایسه نمودند. نی‌مرخ‌های عرضی و قائم سرعت به‌دست آمده از این مدل ریاضی مطابقت به نسبت خوبی با مشاهدات آزمایشگاهی داشتند (Fischet antze et al., 2001). عثمان و والتاین با استفاده از مدل آشفتگی k-ε غیرخطی و مدل تنش‌های رینولدزی (RSM)، توزیع سرعت جریان و همچنین جریان ثانویه در مقاطع مرکب با بستر صلب را مدل‌سازی نمودند. نتایج آن‌ها حاکی از دقت مناسب هر دو مدل در تخمین توزیع دوبعدی سرعت جریان و نیز شدت جریان‌های ثانویه بود (Othman and Valentine., 2006). حسینی و علوی مقدم (۱۳۸۶) با استفاده از روش‌های مختلف دبی کانال مرکب را بدست آوردند. کانووی و همکاران هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب با بستر صلب و آبرفتی را به کمک مدل ریاضی سه‌بعدی SSIIM مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها روابط دبی-اشل و توزیع عرضی سرعت جریان در مقاطع مرکب FCF را به کمک این مدل ریاضی محاسبه نمودند. این تحقیق نشان داد که نتایج مدل ریاضی سه‌بعدی از دقت مناسبی برخوردار بوده و در مقایسه با نتایج روش یک‌بعدی تجزیه قائم مقطع مرکب از مطابقت بیش‌تری با داده‌های آزمایشگاهی برخوردار است (Conway et al., 2012). نجفیان و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب غیرمشموری با بستر صلب و دشت‌های سیلابی زبر را مدل‌سازی نمودند. نتایج مدل‌سازی آن‌ها نشان داد که در محل اتصال کانال اصلی و دشت سیلابی یک ناحیه اندرکنشی قوی اتفاق می‌افتد که با مشاهدات آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش زاویه واگرایی دشت‌های سیلابی، گرادیان سرعت در لایه برشی بین مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی نیز افزایش می‌یابد. در این تحقیق به کمک مدل ریاضی سه‌بعدی در نرم‌افزار FLOW-3D ساختار جریان در مقاطع مرکب با بستر صلب و آبرفتی شبیه‌سازی شده و رابطه دبی-اشل آن‌ها محاسبه شد. ویژگی مهم در تحقیق فوق ورودی‌های مدل ریاضی مورد استفاده شبیه مدل‌های یک‌بعدی بوده و شامل عمق جریان، هندسه مقطع مرکب و ضریب

تعداد شبکه‌های محاسباتی در حالت کانال با بستر صلب حدود ۹۱۲۹۱۲ و در حالت بستر آبرفتی حدود ۶۰۴۵۰۰ بدست آمد. همانطور که مشاهده می‌شود در جهت X و Z ابعاد ثابت ولی در جهت عرض (Y) از درشت به ریز تغییر یافته و تغییرات زیادی در جهت عرض داشته است. در کانال FCF-A دلیل انتخاب ابعاد (۰/۱۲، ۰/۰۱۱، ۰/۱۶۹) و تعداد مش ۹۱۲۹۱۲ این است که زمان کم‌تر و مش بهینه و همچنین به جواب واقعی ما نزدیک‌تر و مطابقت بهتری دارد. همچنین برای FCF-C به دلیل ابعاد (۰/۰۳۳، ۰/۰۱۳۳) و تعداد مش ۶۰۴۵۰۰ انتخاب شده است که دبی به یک مقدار ثابت رسیده است و به‌عنوان مش بهینه انتخاب شده است.

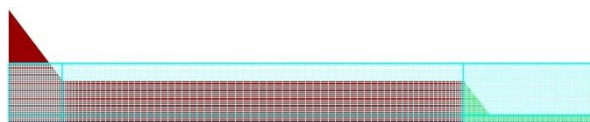
میدان جریان است. معمولا شبکه‌بندی میدان حل طوری انجام می‌شود که استقلال شبکه تضمین شود. برای دستیابی به این هدف، ابعاد شبکه به صورت مستمر کاهش می‌یابد تا جایی که نتایج حل تحت تاثیر ابعاد شبکه محاسباتی تغییر نکند. در شکل ۳، نحوه شبکه‌بندی میدان حل در کانال‌های با مقطع مرکب مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شبکه‌بندی در عرض کانال به صورت یکنواخت نبوده و در جداره مقطع اصلی به دلیل پیچیدگی جریان و وجود گردابه‌های ناشی از اتلاف انرژی، شبکه‌بندی ریزتری انتخاب شده است. به دلیل متقارن بودن هر دو مقطع مرکب، فقط یک نیمه از کانال مدنظر قرار گرفته است.



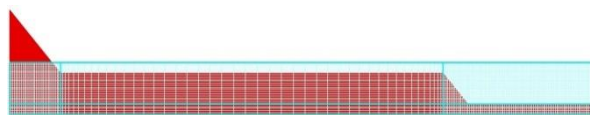
شکل ۲- مقطع عرضی مقاطع مرکب مورد استفاده (فاز A و فاز C)

جدول ۱- مشخصات هندسی و هیدرولیکی مقاطع مرکب فاز A و فاز C

کانال آزمایشگاهی channel	B(m)	b (m)	S0	H(m)	h(m)
فاز A	۳/۱۵	۰/۷۵	۰/۰۲	-۰/۱۵۶۵	۰/۱۵
			۰/۷	۰/۲۸۸	
فاز C	۴	۰/۸	۰/۰۱۸۳	-۰/۲۲۳۹	۰/۲
			۰/۴	۰/۲۹۳۵	



(الف)



(ب)

شکل ۳- نحوه شبکه‌بندی میدان حل در مقاطع مرکب مورد استفاده، (الف) کانال با بستر صلب (FCF-A)، (ب) کانال با بستر آبرفتی (FCF-C)

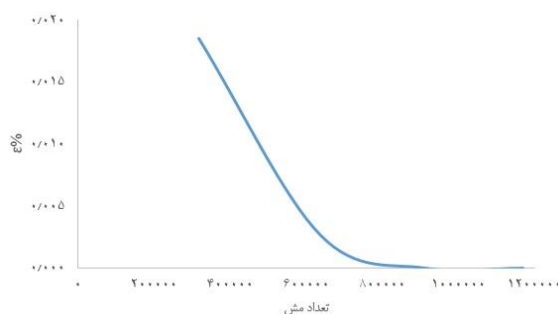
جدول ۲- استقلال شبکه و اندازه مش برای کانو وی و همکاران-فاز

(Conway et al., 2012) (۲۰۱۲) A

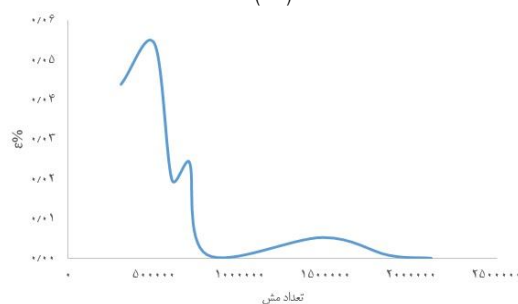
تعداد مش	اندازه مش (m)			دبی (m <sup>3</sup> /s)	زمان (min)
	X	Y	Z		
۳۱۹۲۰۰	۰/۱۶۹	۰/۰۳	۰/۰۱۲	۰/۷۴۱	۱۳۵
۶۲۸۴۰۰	۰/۱۶۹	۰/۰۱۴	۰/۰۱۲	۰/۷۵۳	۳۱۵
۹۱۲۹۱۲	۰/۱۶۹	۰/۰۱۱	۰/۰۱۲	۰/۷۵۵	۴۹۷
۱۱۶۸۷۲۲	۰/۱۶۹	۰/۰۰۹	۰/۰۱۲	۰/۷۵۵	۶۱۰

جدول ۳- استقلال شبکه و اندازه مش برای کانو وی و همکاران-فاز C (۲۰۱۲) (Conway et al., 2012)

تعداد مش	اندازه مش (m)			دبی (m <sup>3</sup> /s)	زمان (min)
	X	Y	Z		
۳۰۶۹۰۰	۰/۱۳۳	۰/۰۵۵	۰/۰۱	۰/۷۶۷۱	۱۸۰
۵۰۲۳۰۰	۰/۱۳۳	۰/۰۲۵۷	۰/۰۱	۰/۷۵۸۸	۳۳۱
۶۰۴۵۰۰	۰/۱۳۳	۰/۰۲۳	۰/۰۱	۰/۷۸۶۵	۳۳۷
۷۰۶۸۰۰	۰/۱۳۳	۰/۰۲۵	۰/۰۱	۰/۷۸۲۹	۳۳۶
۸۰۹۱۰۰	۰/۱۳۳	۰/۰۲۲	۰/۰۱	۰/۸۰۱۷	۴۵۶
۱۴۸۸۰۰۰	۰/۱۳۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱	۰/۷۹۸۲	۸۰۶
۱۸۶۹۳۰۰	۰/۱۳۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۸۰۱۸	۹۸۶
۲۱۲۰۴۰۰	۰/۱۳۳	۰/۰۰۹	۰/۰۱	۰/۸۰۲۴	۲۱۷۰



(الف)



(ب)

شکل ۴- نمودار درصد خطای نسبی دبی به تعداد مش، (الف) FCF-A، (ب) FCF-C

بالادست) استفاده شد (یعنی مقادیر متغیر هیدرولیکی جریان، تراز سطح آب یا عمق جریان، در مرز ورودی بالادست معلوم و مشخص است). به دلیل یکنواخت بودن شرایط جریان در کانال‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه و ثابت ماندن تراز سطح آب در طول کانال، شرط مرزی پایین دست نیز از نوع دیریکله استفاده شد. همچنین به دلیل روباز بودن این کانال‌ها، فضای فوقانی کانال مرکب به صورت سطح آزاد انتخاب شد. در نهایت جداره‌ها و کف کانال‌ها به صورت دیواره در نظر گرفته شد.

#### مدل‌های آشفتگی

اساس معادلات حاکم برای حل جریان‌های آرام و متلاطم یکسان بوده و از معادلات ناویراستوکس<sup>۲</sup> (پیوستگی و مومنتوم)

لازم به ذکر است که برای اینکه ما ابعاد (۰/۰۱، ۰/۰۱، ۰/۱۳۳) و تعداد مش ۱۸۶۹۳۰۰ را برای فاز FCF-C انتخاب نکردیم این است که زمان و حجم محاسبات بسیار بالاست. استقلال مش به این معنی که مدل به یک دبی ثابت و در زمان مناسب برسد. ۴٪ درصد خطای نسبی دبی بدست آمده از بیشترین تعداد مش از رابطه (۱) بدست می آید:

$$\% \varepsilon = |(Q_i - Q_{max}) / Q_{max}| * 100 \quad (1)$$

$Q_{max}$  = دبی بدست آمده از بیشترین مش،  $Q_i$  = دبی بدست آمده

از هر مش

شرایط مرزی مورد استفاده برای حل جریان به این صورت است که از شرط دیریکله<sup>۱</sup> در ورودی بالادست کانال (شرط مرزی

LES و  $k-\epsilon$  برای کانال FCF-A عمق ۰/۲۱۴ به ترتیب ۲/۷ و ۳ و ۲/۴ درصد است، همچنین برای کانال FCF-C به ترتیب ۱۱/۲۳ و ۸/۶۱ و ۳/۸ درصد است.

در کانال FCF-A به دلیل صاف بودن بستر مجرای اصلی و دشت‌های سیلابی، از ضریب زبری مانینگ یکسان ۰/۱۱ استفاده شد. برای FCF-C با توجه به آبرفتی بودن بستر مجرای اصلی، از رابطه ۲ برای محاسبه ارتفاع زبری استفاده شد (Conway et al., 2012).

$$k_s = 3d_{90} + 1.1\Delta(1 - e^{-25\Psi}) \quad (2)$$

که  $\Delta$  ارتفاع متوسط فرم بستر،  $d_{90}$  اندازه قطر ذره‌ای از رسوب بستر که ۹۰ درصد ذرات از آن ریزتر می‌باشند، و  $\Psi = \Delta/\lambda$  شیب فرم بستر است که  $\lambda$  طول متوسط فرم بستر مجرای اصلی است.

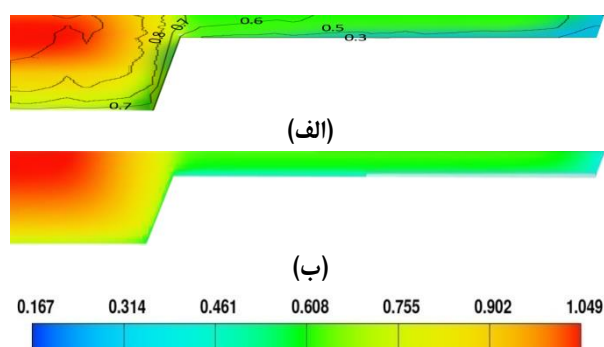
در شکل ۵ نتایج منحنی‌های هم‌سرعت جریان یا توزیع دوبعدی سرعت در جهت جریان برای کانال آزمایشگاهی FCF-A (با بستر صلب) به ازای عمق جریان ۰/۲۱۴ متر (عمق نسبی) در هر دو حالت آزمایشگاهی و محاسباتی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر سرعت جریان در مقطع اصلی و دشت سیلابی در دو حالت آزمایشگاهی و محاسباتی مطابقت مناسبی دارند. در هر دو حالت، سرعت متوسط جریان در دشت سیلابی حدود ۰/۶ متر بر ثانیه و سرعت حداکثر در مقطع اصلی حدود ۱/۰۵ متر بر ثانیه می‌باشد. پروفیل‌های قائم و عرضی سرعت محاسباتی نیز مطابقت خوبی با پروفیل‌های اندازه‌گیری شده دارند. البته خطای اندکی در مجاورت جداره‌های کانال و به ویژه در ناحیه اتصال مقطع اصلی به دشت سیلاب مشاهده می‌شود که با توجه به وجود گردابه‌های قوی و نیز تبادل مومنوم در این ناحیه، این خطا قابل پیش‌بینی بود.

استفاده می‌شود. در شرایط جریان متلاطم به دلیل وجود گردابه‌های ناشی از تنش‌های برشی، معادلات ناویر استوکس به صورت متوسط زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با انجام این کار، یکسری عبارت‌های اضافی در معادلات ظاهر می‌شوند که از نوع تنش تفسیر شده و آن‌ها را تنش‌های آشفتگی (یا تنش‌های رینولدزی) می‌نامند. مدل‌های آشفتگی متفاوتی برای حل این عبارت‌های اضافی مورد استفاده قرار می‌گیرند که عبارتند از گردابه‌های بزرگ (LES)،  $k-\epsilon$  استاندارد و  $k-\epsilon$ -RNG. برای هر پدیده‌ای و بر اساس شدت و وضعیت تلاطم جریان، ممکن است مدل آشفتگی خاصی بهتر باشد. به همین منظور در مدل‌سازی ریاضی پدیده‌ها به کمک نرم‌افزارهای سه‌بعدی، باید علاوه بر انجام آزمون استقلال شبکه محاسباتی، بهینه‌سازی مدل آشفتگی و نیز بهینه‌سازی ضرایب اصطلاحی نیز مدنظر قرار گیرد. در این تحقیق از مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$ ، RNG، LES برای شبیه‌سازی و از روش سطح آزاد (VOF) استفاده شد.

## نتایج

### واسنجی مدل ریاضی

برای اطمینان از نتایج هیدرولیک جریان به‌دست آمده از مدل‌های ریاضی، این مدل‌ها باید واسنجی شوند. واسنجی مدل‌های ریاضی سه‌بعدی به کمک انتخاب مدل آشفتگی بهینه و نیز انتخاب ضریب زبری بهینه است. در این تحقیق، با اجرای نرم‌افزار FLOW-3D در حالت‌های انتخاب مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  و RNG و LES مشخص شد که برای تمامی شرایط هیدرولیک جریان در هر دو کانال مرکب FCF-A و FCF-C، مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  برای کانال فاز C و برای فاز A مدل آشفتگی RNG دارای بهترین نتایج توزیع دوبعدی سرعت می‌باشد. خطاهای نسبی دبی کل بدست آمده از مدل‌های RNG و



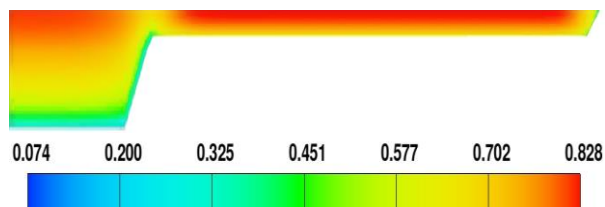
شکل ۵- نتایج توزیع دوبعدی سرعت جریان در کانال FCF-A به ازای عمق جریان ۰/۲۱۴ متر، (الف) نتایج آزمایشگاهی، (ب) نتایج مدل ریاضی

سرعت جریان در این کانال قابل اشاره است این است که در مقایسه با کانال FCF-A با بستر صلب، سرعت در مجرای اصلی آبرفتی به دلیل افزایش ضریب زبری مانینگ با کاهش زیادی مواجه شده است،

در شکل ۶ نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار FLOW-3D در کانال آزمایشگاهی (با بستر رسوبی) و به ازای عمق جریان ۰/۲۹۳۵ متر (عمق نسبی) ارایه شده است. نکته قابل توجهی که در نتایج توزیع دوبعدی

دشت‌های سیلابی رودخانه‌ها نسبت به مجرای اصلی دارای ضریب زبری بیش‌تری بوده و به همین دلیل سرعت مجرای اصلی بیش‌تر از دشت‌های سیلابی خواهد بود.

به طوری که از سرعت جریان در دشت سیلابی نیز کم‌تر شده است. تقریباً در تمام عرض دشت سیلاب، سرعت جریان بسیار زیاد می‌باشد. البته این وضعیت در رودخانه‌ها به ندرت اتفاق می‌افتد چون معمولاً



شکل ۶- نتایج محاسباتی توزیع دوبعدی سرعت جریان در کانال FCF-C (عمق جریان ۰/۲۹۳۵ متر)

ویژه برای کانال آزمایشگاهی FCF-A (با بستر صلب) مناسب می‌باشد و نتیجه مدل‌های SSIIM, DCM بدست آمده از تحقیق (کانووی و همکاران، ۲۰۱۲) بهتر است. برای کانال FCF-C (با بستر آبرفتی) به دلیل تغییرات شدید سرعت در مقطع اصلی، نتایج نرم‌افزار FLOW-3D در این مجرا با خطای کمی همراه است. خطای این مدل در مقطع اصلی و دشت سیلاب برای کانال FCF-A به ترتیب ۳/۰۳ و ۳/۷۸ درصد و برای کانال FCF-C به ترتیب ۱۰/۱۹ و ۳/۰۳ درصد می‌باشد. جدول ۲ متوسط خطای نسبی توزیع سرعت نتایج مدل (FLOW3D) و کانووی و همکاران، ۲۰۱۲ با هم مقایسه شده- اند که نشان می‌دهد مدل FLOW3D دقت بالاتری نسبت به دو مدل دیگر دارد (Conway et al, 2012).

با توجه به اهمیت توزیع عرضی سرعت در مقاطع مرکب، در شکل ۷ نتایج توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق به دست آمده از نرم‌افزار FLOW-3D در کانال آزمایشگاهی FCF-A در عمق جریان ۰/۲۱۴ متر با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج تحقیق (کانووی و همکاران، ۲۰۱۲) (Conway et al., 2012) مقایسه شده است.

خطای مدل از رابطه ۲ بدست آمده است

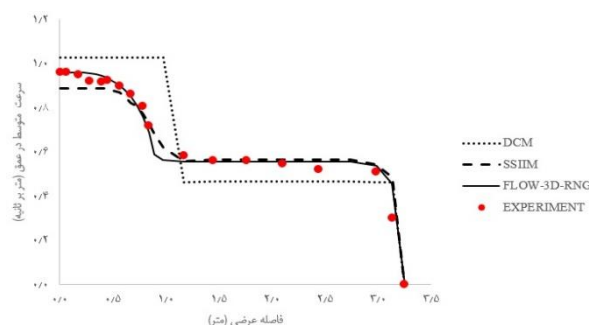
$$\% \varepsilon = \sum |(V_{mes} - V_{mod}) / V_{mes}| * 100 \quad (2)$$

که در آن  $V_{mes}$  سرعت اندازه‌گیری شده،  $V_{mod}$  سرعت محاسباتی با استفاده از مدل می‌باشد.

با توجه به نتایج ارائه شده مشخص می‌شود که دقت مدل ریاضی در محاسبه توزیع سرعت در هر دو مجرای اصلی و دشت سیلاب و به

جدول ۴- مقایسه متوسط خطای نسبی توزیع سرعت نتایج مدل (FLOW-3D) و نتایج کانووی و همکاران (۲۰۱۲) (Conway et al., 2012)

کانووی و همکاران (۲۰۱۲)		تحقیق حاضر (FLOW-3D)	
۱۶/۳۶	۸/۷۶	۴/۵۱	FCF-A
۱۲/۰۸	۹/۲۹	۷/۱۹	FCF-C



شکل ۷- مقایسه نتایج محاسباتی و مشاهداتی توزیع عرضی سرعت جریان در مقاطع مرکب، برای کانال FCF-A به ازای عمق جریان ۰/۲۱۴ متر

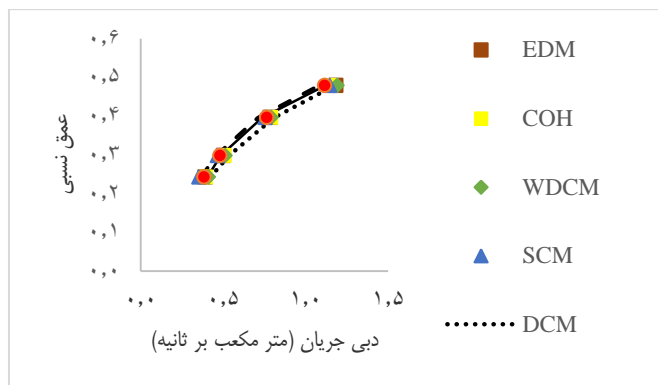
هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در کانال FCF-A مورد مطالعه، دقت منحنی دبی- اشل به دست آمده از نرم‌افزار

در شکل‌های ۸ الف و ب نتایج محاسباتی با روش‌های مختلف و مشاهداتی روابط دبی- اشل کانال‌های مرکب FCF-A و FCF-C با

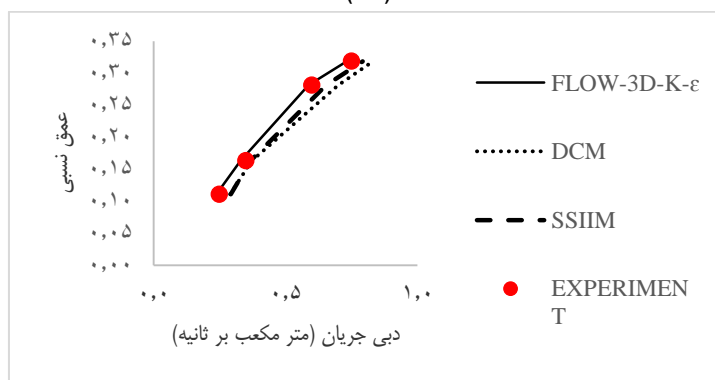


بالا تر است. همچنین در شکل ۸ (ب) برای فاز FCF-C که دقت FLOW-3D نیز نسبت به SSIIM و DCM بالاتر است. متوسط خطای نسبی دبی کل در جدول ۵ و ۶ آورده شده است. نکته جالب توجه در این محاسبات این است که روش معمول تجزیه مقطع مرکب در حالت کانال با مجرای اصلی صلب دارای خطای کمتری در مقایسه با کانال با بستر آبرفتی است.

FLOW-3D نسبت به مدل SSIIM و نیز روش تجزیه قایم مقطع مرکب (DCM) نتیجه مدل های DCM SSIIM بدست آمده از تحقیق کانووی و همکاران (Conway et al., 2012) و همچنین با نتایج روش مقطع واحد (SCM)، نرم افزار (HEC-RAS)، روش-کوهرنس (COH)، روش تقسیم مقطع وزنی (WDCM)، مدل تبادل دبی (EDM) (حسینی و علوی مقدم (۱۳۸۶)) مقایسه شدند و نیز



(الف)



(ب)

شکل ۸- مقایسه نتایج محاسباتی با روش های مختلف با مقادیر آزمایشگاهی منحنی دبی - اشل در مقاطع مرکب، الف) FCF-A، ب) FCF-C

جدول ۵- مقایسه متوسط خطای نسبی نتایج دبی اشل مدل (FLOW-3D) و نتایج حسینی و علوی مقدم (۱۳۸۶)

عمق نسبی	داده آزمایشگاهی	حسینی و علوی مقدم (۱۳۸۶)						
		FLOW-3D	DCM	SCM	WDCM	COH	EDM	HEC-RAS
-۰/۲۴۲	-۰/۲۸۳	-۰/۴۰۴	-۰/۴۲۲	-۰/۳۵۲	-۰/۴۱۱	-۰/۳۹۴	-۰/۳۹۲	-۰/۴۲۱
-۰/۲۹۸	-۰/۴۸	-۰/۴۸۶	-۰/۵۳۵	-۰/۴۶۶	-۰/۵۱۲	-۰/۵۰۶	-۰/۵۰۲	-۰/۵۳۲
-۰/۳۹۶	-۰/۷۶۳	-۰/۷۵۳	-۰/۸۰۷	-۰/۴۵۵	-۰/۷۹۱	-۰/۷۸۹	-۰/۷۸۵	-۰/۸۳۸
-۰/۴۷۹	۱/۱۱۴	۱/۱۹۳	۱/۱۷۶	۱/۱۴۶	۱/۱۹۱	۱/۱۵۴	۱/۱۸۳	۱/۱۲۲
قدر مطلق میانگین خطای نسبی دبی		۲/۷	۸/۲۳	۲/۷۳	۶/۱۳	۸۲/۳	۴	۷/۳۵

جدول ۶- مقایسه متوسط خطای نسبی توزیع سرعت نتایج مدل (FLOW-3D) و نتایج کانووی و همکاران (Conway et al., 2012) (۲۰۱۲)

کانووی و همکاران (۲۰۱۲)	تحقیق حاضر (FLOW-3D)	
	۸/۲۳	۴/۵۹
۱۲/۳۶	۹/۱۶	۳/۸
		FCF-A
		FCF-C



## نتیجه‌گیری

با توجه به محدودیت مطالعات مدل‌سازی سه‌بعدی هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب و به ویژه مقاطع مرکب با بستر آبرفتی، در این تحقیق به کمک نرم‌افزار FLOW-3D، توزیع دوبعدی و شبه سه‌بعدی سرعت جریان و نیز منحنی دبی-اشل در مقاطع مرکب با بستر صلب و آبرفتی مدل‌سازی شده است. با واسنجی مدل ریاضی، مشخص شد که از بین مدل‌های آشفتگی، مدل RNG برای فاز A و مدل k-ε برای کانال فاز C دارای بالاترین دقت است. نتایج منحنی‌های هم‌سرعت در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی به‌دست آمده از نرم‌افزار FLOW-3D نشان داد که مطابقت خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته و سرعت‌های حداکثر را در هر دو بخش به خوبی برآورد کرده‌اند. در حالت مقطع مرکب با بستر آبرفتی، دقت نتایج مدل‌سازی نسبت به حالت بستر صلب تا حدودی کاهش یافته است که با توجه به تشکیل فرم بستر و در نتیجه پیچیدگی شرایط هیدرولیکی و رسوبی بستر در این حالت، این کاهش دقت منطقی است. همچنین مقایسه نتایج نرم‌افزار FLOW-3D با نتایج به‌دست آمده از روش تجزیه قائم مقطع مرکب DCM و نیز مدل SSIIM نشان داد که نتایج مطالعه حاضر در هر دو کانال آزمایشگاهی با بستر صلب و آبرفتی از دقت بیش‌تری برخوردار است. بنابراین برای مدل‌سازی هیدرولیک جریان سیلاب در رودخانه‌های طبیعی که مجرای اصلی عموماً دارای بستر آبرفتی است، استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D قابل توصیه و پیشنهاد می‌باشد.

## منابع

- حسینی، س.م.، علوی مقدم، س.م.ر. ۱۳۸۶. طرح تحقیقاتی بررسی‌های نظری و آزمایشگاهی در محاسبات نیم‌رخ‌های سطح آب در کانال‌های مرکب، شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان.
- نجفیان، ش.، یونسی، ح.، پارسایی، ع.، ترابی پوده، ح. ۱۳۹۵. مدل‌سازی فیزیکی و عددی هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب با سیلاب دشت‌های غیرمنشوری و زیر، مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۷، ۶۶.
- Ackers, P. 1992. Hydraulic design of two-stage channels. *Journal of Water Marittim. Engineering.* 96: 247-25.
- Atabay, S., Knight, D.W. 2006. 1-D modelling of conveyance, boundary shear and sediment transport in overbank flow. *Journal of Hydraulic Research* 44:6. 739-754.
- Bousmar, D., Zech, Y. 1999. Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125:7. 696-706.
- Chow, V.T. 1959. *Open channel hydraulics*. Mc Graw-Hill, London.
- Cassells, J.B.C., Lambert, M.F., Myers, R.W.C. 2001. Discharge prediction in straight mobile bed compound channels. *Proceeding of the Institution of Civil Engineers, Water & Maritime Engineering.* 148:3.177-188.
- Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K., Sellin, R.H.J. 2000. Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows. *Journal of Hydraulic Engineering* 126: 653-669.
- Conway, P., Osullivan, J.J., Lambert, M.F. 2012. Stagedischarge prediction in straight compound channels using 3D numerical models. *Proc. of the Institution of Civil Engineers, Water and Maritime Engineering.* 166: 3-15.
- Fischer-Antze, T., Stosser, T., Bates, P., Olsen, N.R.B. 2001. 3D numerical modelling of open-channel flow with submerged vegetation. *Journal of Hydraulic Research* 39:3. 303-310.
- Huthoff, F., Roose, P.C., Augustijn, D.C.M., Hulscher, S.J.M.H. 2008. Interacting divided channel method for compound channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 134:8.1158-1165.
- Hu, C., Ju, Z., Guo, Q. 2010. Flow movement and sediment transport in compound channels. *Journal of Hydraulic Research* 48:1. 23-32.
- Lambert, M.F., Sellin, R.H.J. 1996. Discharge prediction in straight compound channels using the mixing length concept. *Journal of Hydraulic Research* 34: 381-394.
- Lambert, M.F., Myers, W.R.C. 1998. Estimating the discharge capacity of straight compound channels. *Proceeding of Institute Civil Engineers, Water and Maritime Engineering* 130:2. 84-94.
- McGahey, C., Samuels, P.G., Knight, D.W. 2006. A practical approach to estimating the flow capacity of rivers-application and analysis. *Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, River Flow 2006*, Taylor and Francis, Lisbon.
- Othman, F., Valentine, E.M. 2006. Numerical modelling of the velocity distribution in a compound channel. *Journal of Hydrology and Hydromechanic.* 54:3. 269-279.
- Sellin, R.H.J. 1964. A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its floodplain. *La Houille Blanche.* 7: 703-801.
- Shiono, K., Knight, D.W. 1991. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics.* 222:6. 617-646.
- Seckin, G., Mamak, M., Atabay, S., Omran, M. 2009.

- White, W.R., Paris, E., Bettes, R. 1980. The frictional characteristics of alluvial streams: a new approach. Proceeding of Institute of Civil Engineering. 69:2.737-75027.
- Zahiri, A., Azamatullah, H.Md. 2014. Comparison between linear genetic programming and M5 tree models to predict flow discharge in compound channels. Neural Computing and Applications. 24:2. 413-420.
- Discharge estimation in compound channels with fixed and mobile bed. Sadhana. 34: 923-945.
- Van Rijn, L.C. 1984. Sediment transport, Part I: Bed load transport. Journal of Hydraulic Engineering 110:10. 1431-1456.
- Wark, J.B., James, C.S., Ackers, P. 1994. Design of straight and meandering compound channels. Interim Guidelines on Hand Calculation Methodology, R and D Report 13, UK.

## Three-Dimensional Model of Compound Channel With Rigid and Alluvial Bed for Determination of Velocity Distribution and Discharge-Stage Relationship

F. Darvish Mojeni<sup>1</sup>, S. R. Khodashenas<sup>2\*</sup>, A. R. Zahiri<sup>3</sup>

Received: Oct.08, 2017

Accepted: Des.14, 2017

### Abstract

There are numerous investigations, which carried out regarding solution of lateral distribution of flow velocity and flow discharge computation in compound channels. Most of these researches have been in the case of rigid beds. However, compound river channels have alluvial beds and hydraulically have many differences with the experimental channel with rigid beds. In the case of alluvial bed channels due to the interaction effect of flow and bed sediments in main channel, bed forms as dunes develop and change the riverbed roughness coefficient. Furthermore, the flow pattern in compound channels is essentially three-dimensional and hence it is better to use 3-D mathematical models for solution of their hydraulic problems.

In this study using mathematical model of FLOW-3D, two and three-dimensional variations of flow velocity in straight compound channels with rigid and alluvial beds have been simulated and compared with the experimental data of Wallingford Hydraulic Research. The lateral distribution of velocities and stage-discharge curves from two large-scale trapezoidal channels including FCF-A with rigid bed and FCF-C with alluvial bed were used in this study.

The results showed that flow velocity contours and the lateral distribution of velocity obtained by FLOW-3D model have suitable agreement with the experimental data in both cases of main channel and floodplains. The results of these comparisons also showed that the flow rates of the FLOW-3D model are in great agreement with laboratory data, so that the maximum and average of the relative errors of these results for the channel with rigid bed were 5% and 2.7% and for channels with alluvial bed it was 6% and 3.8%, respectively. Finally, the results obtained from the FLOW-3D model with the results of a one-dimensional DCM, SCM, HEC-RAS, COH, WDCM, EDM and the results of the SSIIM model. This comparison highlighted the superior ability of the FLOW-3D model in flow hydraulic simulation of compound channels with rigid and alluvial beds.

**Keywords:** Alluvial bed, Calibration, Compound channels, FLOW-3D mathematical model, Velocity lateral distribution

1- M.Sc.Student, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

2- Professor, Water Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

3- Associate Prof, Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

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