

## مطالعه عددی اثر عرض سیلاب‌دشت‌های کانال مرکب منشوری بر روی میدان جریان و اندرکنش بین جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها

علیرضا صفارزاده<sup>۱</sup> و بهرام رضایی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> فارغ التحصیل کارشناسی ارشد عمران- آب، دانشگاه بوعلی سینا

<sup>۲</sup> استادیار گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

\* نویسنده مسئول

دریافت ۹۴/۷/۳ پذیرش ۹۵/۲/۱۲

### چکیده

پیش‌بینی مشخصات جریان در کانال‌های مرکب به علت ماهیت سه بعدی جریان برای مهندسين هیدرولیک امری دشوار تلقی می‌شود. مشخصه اصلی جریان در کانال‌های مرکب منشوری شامل اثر اندرکنش بین جریان سریع در کانال اصلی و جریان کندتر در سیلاب‌دشت‌ها می‌شود. این اختلاف سرعت سبب ایجاد یک لایه برشی در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت شده که در نتیجه این امر بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها تبادل اندازه حرکت صورت می‌پذیرد. نتیجه این امر کاهش ظرفیت انتقال جریان در کانال اصلی و افزایش آن در سیلاب‌دشت‌ها می‌باشد. در این تحقیق تلاش گردیده است که میدان جریان در کانال‌های مرکب منشوری شامل توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق و تنش برشی به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-CFX شبیه‌سازی گردد. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی که از حل معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده رینولدزی با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  به دست آمده، با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که کم و بیش انطباق خوبی بین آن‌ها وجود دارد. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی عددی به مطالعه تأثیر دبی و هندسه کانال مرکب بر روی اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها پرداخته شده است.

**واژگان کلیدی:** کانال مرکب، میدان جریان، شبیه‌سازی عددی، مدل آشفتگی  $k-\epsilon$ ، اندرکنش بین جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها.

### ۱- مقدمه

تفاوت عمق و سرعت جریان در سیلاب‌دشت‌ها و کانال اصلی و نیز تفاوت زبری سبب می‌شود که اندرکنشی بین جریان سیلاب-دشت‌ها و کانال اصلی صورت پذیرد که این اندرکنش رفتار هیدرولیکی جریان در کانال‌های مرکب را پیچیده می‌سازد. بررسی رفتار جریان در کانال‌های مرکب به علت پیچیدگی‌های خاص آن‌ها از دیرباز مورد توجه محققین هیدرولیک بوده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، هنگامی که جریان وارد سیلاب‌دشت‌ها می‌شود، به دلیل اختلاف سرعت جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها لایه‌های برشی جانبی به وجود می‌آید که به صورت جریان گردابی در پلان دیده می‌شود این پدیده به وسیله Sellin [۱]، Ikeda [۲]، Bousmar [۳] و Rezaei [۴] نشان داده شده است. Wormleaton [۵]، Knight و همکاران [۶]، Wark و همکاران [۷] و Ervine و همکاران [۸] به کمک داده‌های آزمایشگاهی و بر اساس

یکی از جنبه‌های مهم هیدرولیک رودخانه‌ها، توزیع عرضی سرعت و تنش برشی مرزی آن‌ها است. رودخانه‌ها در محدوده انتهایی خود معمولاً به شکل مقطع مرکب ظاهر می‌شوند به طوری که در هنگام سیل، آب از کانال اصلی رودخانه لبریز شده و وارد سیلاب‌دشت‌ها می‌شود. سیلاب‌دشت‌ها به واسطه نزدیکی به ساحل رودخانه و نیز داشتن عرض زیاد و خاک حاصل‌خیز همواره از جنبه‌های مختلف تفریحی، تجاری، کشاورزی و مسکونی مورد توجه بوده‌اند. بنابر این آگاهی از هیدرولیک جریان در سیلاب‌دشت‌ها برای تأمین حفاظت انسان‌ها و نیز سازه‌ها و تأسیسات موجود در آن‌ها لازم و ضروری است. در یک کانال مرکب به دلیل تغییرات سریع عمق جریان و ضریب زبری بستر، توزیع عرضی سرعت و تنش برشی به طور قابل ملاحظه‌ای حالتی غیر یکنواخت خواهند داشت. در این شرایط مقطع اصلی به دلیل عمق جریان زیاد و ضریب زبری کم، دارای سرعت بالایی بوده در حالی که سرعت جریان در سیلاب‌دشت‌ها، با توجه به عمق کم و زبری بیشتر، به مراتب کمتر است. بدیهی است که

انجام شده است. تصویر و نمایی از کانال مذکور در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. مقطع عرضی کانال، به صورت مقطع مستطیل شکل ساده انتخاب شده است. این کانال دارای عرض ۱۲۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر و متوسط شیب کف آن  $10^{-3} \times 2/0.03$  می‌باشد.

با استفاده از صفحات PVC یک مقطع مرکب مستطیلی با سیلاب‌دشت‌های به عرض ۴۰۰ میلی‌متر، کانال اصلی با عرض تقریبی ۴۰۰ میلی‌متر و عمق ۵۰ میلی‌متر ساخته شده است. برای انجام آزمایش در کانال مرکب منشوری با سیلاب‌دشت‌های مختلف، کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها با استفاده از پروفیل آلومینیومی L شکل جدا شده‌اند تا سیلاب‌دشت‌هایی با عرض ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر ایجاد گردد.

اندازه‌گیری سرعت نقطه‌ای در مقطعی به فاصله ۱۴ متری از ورودی کانال، با استفاده از سرعت‌سنج پروانه‌ای (از نوع Novar Nixon) به قطر ۱۳ میلی‌متر، در ارتفاع  $0.4H$  از کف کانال اصلی و  $0.4(H-h)$  از کف سیلاب‌دشت و در فواصل عرضی ۲۰ میلی‌متر انجام شده است.

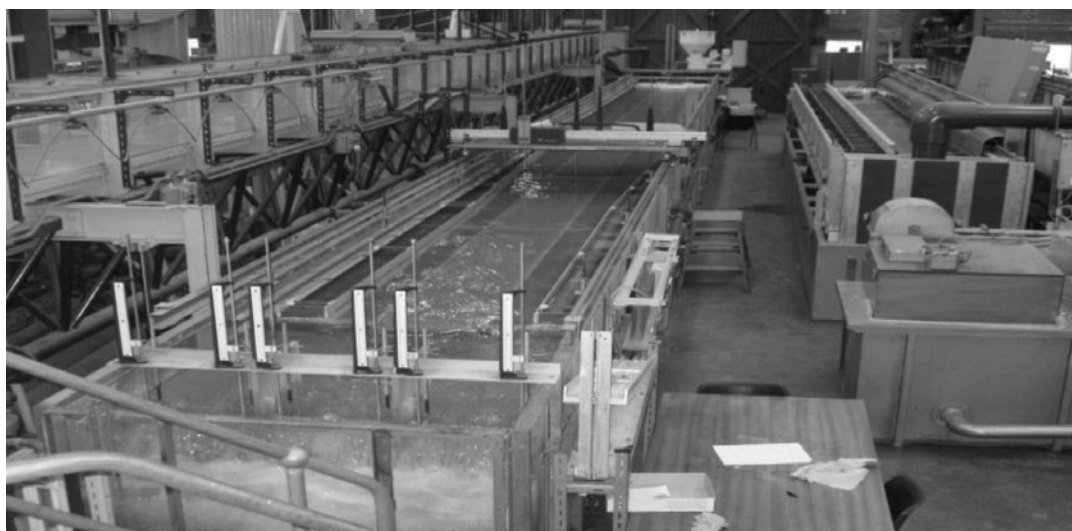
تنش برشی موضعی با استفاده از لوله پریستون به قطر خارجی ۴/۷۷ میلی‌متر در پیرامون مرطوب کانال با فاصله‌های ۱۰ میلی‌متری در دیوارها و ۲۰ میلی‌متری در کف کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها اندازه‌گیری شده است. این اندازه‌گیری در همان مقطعی که سرعت متوسط در عمق به دست آمده، انجام شده است.

معادلات ناویر- استوکس به توسعه مدل‌های تحلیلی دوبعدی برای بیان توزیع جانبی سرعت در کانال‌های مرکب منشوری پرداختند. Naot و همکاران [۹] با استفاده از یک مدل جبری تنش رینولدز که توسط Rodi و Naot [۱۰] توسعه داده شده است، به شبیه‌سازی جریان در کانال مرکب منشوری پرداخته و برای اعتبار سنجی نتایج به دست آمده، از داده‌های آزمایشگاهی Tominaga و Nezu [۱۱] استفاده نمودند. Cokljat و Younis [۱۲] از مدل انتقال تنش رینولدز جامع که توسط Launder و همکاران [۱۳] بیان شده بود برای محاسبه جریان در کانال ساده و مرکب (متقارن و نامتقارن) استفاده نمودند. MacWilliams [۱۴] با استفاده از روش اجزاء محدود مدلی سه بعدی برای شبیه‌سازی جریان در سیلاب‌دشت‌ها و کانال اصلی رودخانه‌ها ارائه نمود.

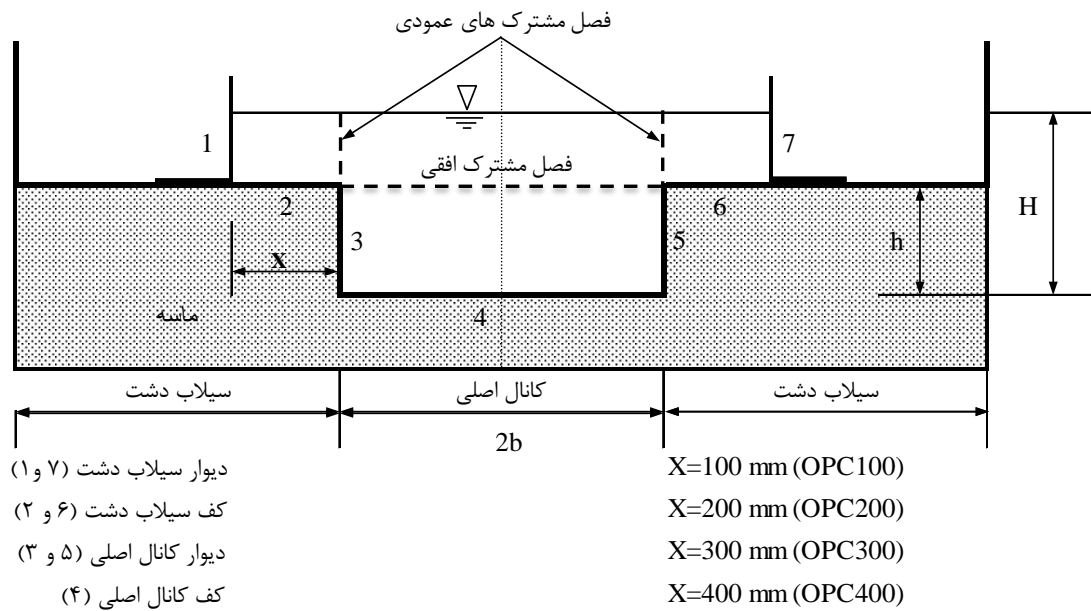
در این تحقیق میدان جریان شامل توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق و توزیع تنش برشی در کانال‌های مرکب منشوری با سیلاب‌دشت‌های به عرض متفاوت با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-CFX به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی که از طریق حل معادلات میانگین زمانی ناویر- استوکس با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  به دست آمده است، با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است.

## ۲- معرفی کانال مرکب مدل شده

آزمایش‌ها در یک کانال ۱۸ متری در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه بیرمنگهام کشور انگلستان



شکل ۱- تصویر کانال آزمایشگاهی



شکل ۲- مقطع عرضی کانال تحقیقاتی

### ۳- شبیه‌سازی عددی جریان در کانال مرکب منشوری

#### ۳-۱- مشخصات میدان جریان

میدان جریان مدل شده، کانال مرکبی است که دارای طول ۲۵ متر (به علت اطمینان از توسعه یافتگی جریان در مدل عددی و ایجاد جریان یکنواخت، طول کانال شبیه‌سازی شده بیشتر از کانال اصلی منظور شده است)، عرض ثابت ۴۰۰ میلی‌متر برای کانال اصلی و عرض‌های متغیر ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر برای سیلاب‌دشت‌ها می‌باشد. از آن‌جا که برای اعتبارسنجی می‌بایست نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردد، لذا مطابق برنامه آزمایش‌ها، از دبی‌های ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۲۷، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ لیتر بر ثانیه برای کانال مرکب با عرض سیلاب‌دشت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر استفاده شد.

#### ۳-۲- معادلات حاکم بر میدان جریان

برای در نظر گرفتن اثرات مربوط به نوسانات آشفتگی روی متغیرهای سرعت و فشار، جریان به صورت مجموع مؤلفه متوسط و نوسانی جای‌گذاری می‌شوند.

(۱)

$$\begin{aligned} u &= U + u' & v &= V + v' \\ w &= W + w' & p &= P + p' \end{aligned}$$

معادلات حاکم بر جریان سیال در حالت آشفته شامل معادلات بقاء جرم و اندازه حرکت است. میانگین زمانی این معادلات برای جریان ماندگار سیال تراکم‌ناپذیر به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) = \\ \rho \frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (3)$$

در این معادلات  $P$  فشار،  $\tau_{ij}$  تانسور تنش (شامل هر دو مؤلفه تنش نرمال و تنش برشی)،  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $\overline{\rho u_i u_j}$  تنش‌های رینولدز بوده و با استفاده از مدل آشفتگی لزجت گردابه‌ای بوسینیسک به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left[ \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right]$$

$$-\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

که  $c_\mu$  ثابت است و برابر  $0.09$  می‌باشد. مقادیر  $\kappa$  و  $\varepsilon$  به صورت مستقیم از معادلات انتقال دیفرانسیلی نرخ انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ پراکندگی آشفتگی به دست می‌آید.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{s1} P_k - C_{s2} \rho \varepsilon) \quad (7)$$

در رابطه فوق  $C_{s1}$ ،  $C_{s2}$ ،  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  ثوابتی هستند که به ترتیب برابر  $1/44$ ،  $1/92$ ،  $1$  و  $1/3$  می‌باشد.  $P_k$  نیز معرف تولید آشفتگی به وسیله نیروهای لزجت بوده و به شکل زیر مدل می‌شود:

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

### ۳-۴- مشخصات شبکه‌بندی انجام شده

در این پژوهش به منظور افزایش دقت نتایج، شبکه‌بندی در نواحی فصل مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها ریزتر شده است. در طول کانال به علت یکسان بودن هندسه کانال، محور طولی کانال به  $125$  نقطه به فواصل  $0.2$  متر تقسیم شده است. جزئیات مربوط به شبکه‌بندی در شکل (۳) آمده است.

### ۴- ارائه نتایج

#### ۴-۱- توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق

توزیع عرضی سرعت متوسط شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل آشفتگی  $\kappa$ - $\varepsilon$  محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. به عنوان نمونه در شکل (۴) برای دبی  $45$  لیتر بر ثانیه در کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های به عرض  $100$ ،  $200$ ،  $300$  و  $400$  میلی‌متر این مقایسه انجام گرفته است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین نتایج حاصل از اندازه‌گیری با داده‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی وجود دارد.

در معادله اخیر نیز  $\mu_t$  لزجت آشفتگی،  $k$  انرژی جنبشی آشفتگی و  $\delta_{ij}$  دلتای کرونکر می‌باشد.

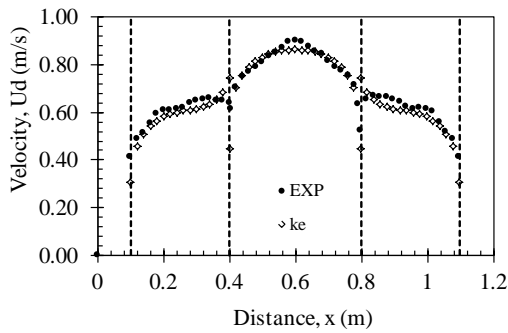
معادلات ناویر-استوکس یک دستگاه معادله دیفرانسیل متشکل از چهار معادله با چهار مجهول  $u$ ،  $v$ ،  $w$  و  $P$  را تشکیل می‌دهند. به هر حال در عملکرد میانگین زمانی روی معادلات اندازه حرکت، جزئیات مربوط به حالت جریان که در نوسانات زمانی نهفته است، کنار گذاشته می‌شود. در نتیجه به شش مجهول اضافی دست یافته می‌شود که همان تنش‌های رینولدز در معادلات میانگین زمانی اندازه حرکت می‌باشند. برای آن‌که سیستم محاسباتی بسته شود و راه حل خاتمه یابد، تنش‌های آشفتگی (رینولدزی) به معادلات اضافی معلومی نیازمند است تا مدل‌سازی شود. این معادلات اضافی که وابسته به تعداد مجهولات است نوع مدل آشفتگی را بیان می‌کند که در این تحقیق از مدل آشفتگی  $\kappa$ - $\varepsilon$  استفاده شده است.

برای پارامترهای سرعت و آشفتگی در ورودی، از شرط مرزی دیرکله استفاده شده است. استفاده از شرط مرزی دیرکله به این معنا است که مقادیر متغیرها در مرز معین باشد. در مرز خروجی برای تمام متغیرها شرط مرزی گرادپایان صفر اعمال می‌شود. حال با توجه به ماهیت شرط مرزی مزبور مبنی بر عدم تغییرات مشخصات جریان در جهت عمود بر این مرز، لازم است تا موقعیت این مرز برای حصول شرط فوق در راستای کانال مشخص شود. اعمال این شرط در مدل با دادن دبی و سطح آب در بالا دست حاصل می‌شود. در مورد دیواره‌ها نیز با بررسی شرایط آزمایشگاهی ضریب زبری معادل پی وی سی در نرم‌افزار در نظر گرفته شده و شرایط آن نیز بدون لغزش منظور گردید.

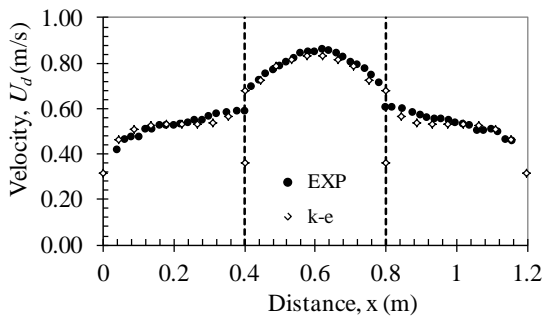
#### ۳-۳- معرفی مدل آشفتگی $\kappa$ - $\varepsilon$

در این مدل،  $\kappa$  انرژی جنبشی آشفتگی است و واریانس نوسانات در سرعت تعریف می‌شود و  $\varepsilon$  پراکندگی (اتلاف) آشفتگی گردابه‌ای می‌باشد (نرخ) که در آن نوسانات سرعت تلف می‌گردد. مدل  $\kappa$ - $\varepsilon$  دو متغیر جدید در سیستم معادلات وارد می‌کند. در مدل  $\kappa$ - $\varepsilon$  فرض می‌شود که لزجت آشفتگی به انرژی جنبشی آشفتگی و اتلاف انرژی آشفتگی از طریق معادله زیر مربوط می‌شود:

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$



OPC300-45 (ج)



OPC400-45 (د)

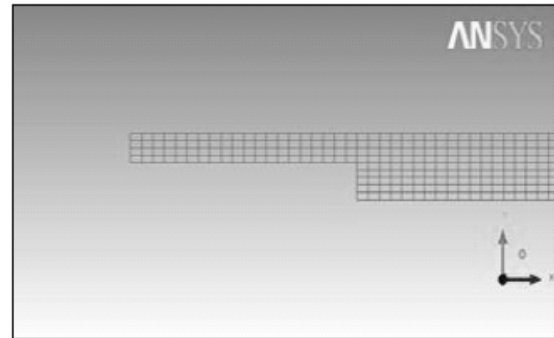
شکل ۴- توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق برای دبی ۴۵

لیتر بر ثانیه و سیلابدشت‌های به عرض: الف) ۱۰۰،

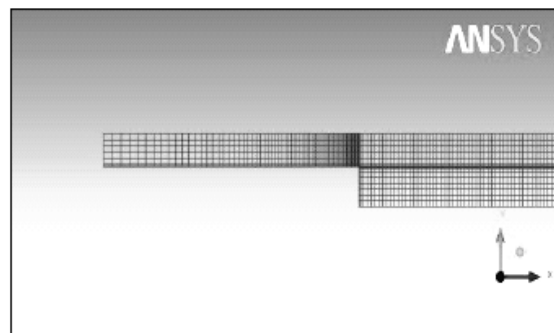
ب) ۲۰۰، ج) ۳۰۰، د) ۴۰۰ میلی‌متر

همچنین با استفاده از انتگرال‌گیری عددی توزیع جانبی سرعت متوسط در عمق، مقدار دبی محاسبه شده و منحنی‌های دبی-اشل برای کانال مرکب مورد نظر و سیلابدشت‌های به عرض مختلف ترسیم شده است (شکل ۵). همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود، انطباق بسیار خوبی بین منحنی‌های دبی اشل ترسیم شده با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و منحنی‌های محاسبه شده از شبیه‌سازی عددی جریان برقرار است.

نسبت‌های سرعت متوسط ناحیه‌ای در کانال اصلی و سیلاب-دشت‌ها  $U_i$  به سرعت متوسط کل  $U_o$  در برابر عمق نسبی  $Dr$  برای کانال مرکب با عرض سیلابدشت‌های مختلف در شکل (۶) ترسیم شده است. در این شکل نمادهای توپیر مقادیر آزمایشگاهی و نمادهای توخالی مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی عددی را نمایش می‌دهد. این شکل به روشنی نشان می‌دهد که نسبت سرعت متوسط در سیلابدشت به سرعت متوسط کل مقطع، تابع عرض سیلابدشت بوده و کمتر از یک است و به همین علت، جریان در سیلابدشت اثر کاهندگی بر سرعت جریان در کانال اصلی را دارد.



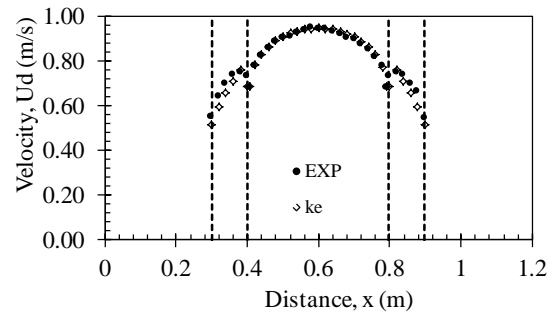
(الف)



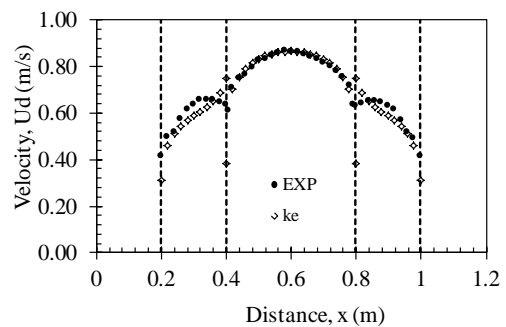
(ب)

شکل ۳- نمایش شبکه‌بندی عرضی: الف) شبکه درشت،

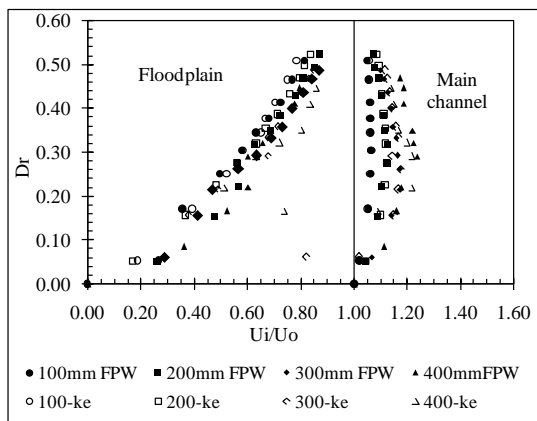
ب) شبکه ریز



OPC100-45 (الف)



OPC200-45 (ب)



شکل ۶- مقایسه نسبت سرعت متوسط ناحیه‌ای در کانال اصلی ( $U_{mc}$ ) و سیلاب‌دشت‌ها ( $U_{fp}$ ) به سرعت متوسط کل ( $U_o$ ) در برابر عمق نسبی ( $Dr=(H-h)/H$ )

همچنین نسبت سرعت متوسط جریان در کانال اصلی به سرعت متوسط کل با افزایش عمق نسبی در ابتدا افزایش و به ازای عمق نسبی تقریبی ۰/۳ به حداکثر مقدار می‌رسد. با افزایش عمق نسبی این نسبت کاهش یافته و سرعت متوسط در کانال اصلی به سرعت متوسط کل مقطع نزدیک می‌شود.

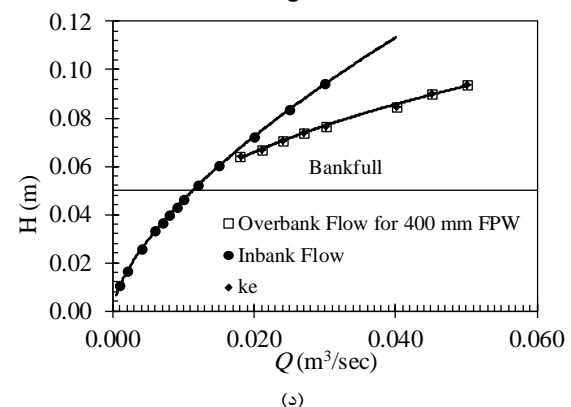
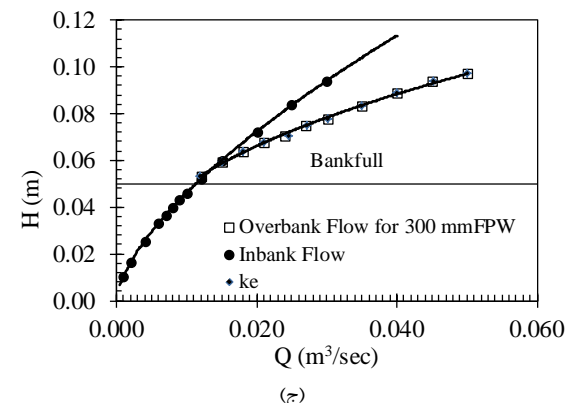
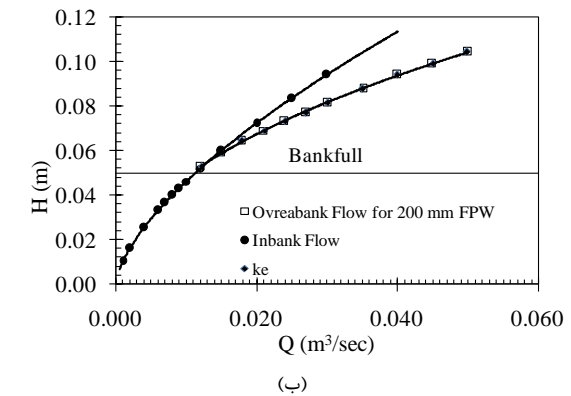
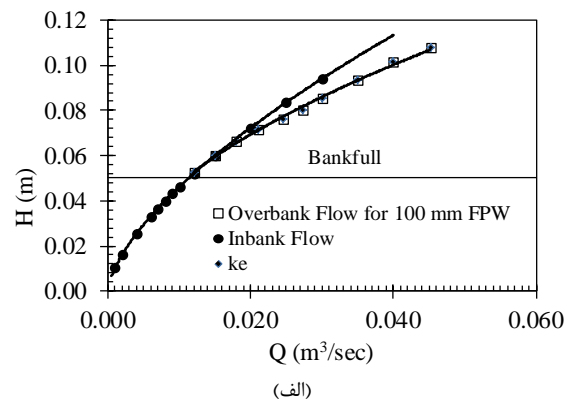
#### ۴-۲- تنش برشی مرزی

توزیع تنش برشی مرزی یکی از عوامل مهم در مهندسی رودخانه می‌باشد که در مطالعات انتقال رسوب و حفاظت بستر رودخانه کاربرد دارد.

توزیع تنش برشی مرزی برای کانال مرکب منشوری با سیلاب‌دشت‌های به عرض ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر و دی‌های مختلف، با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  شبیه‌سازی و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. نمونه‌ای از توزیع تنش برشی شبیه‌سازی شده، برای دی ۴۵ لیتر بر ثانیه در شکل (۷) آمده است. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، توزیع تنش برشی حاصل از شبیه‌سازی عددی در مقایسه با توزیع عرضی سرعت، انطباق کمتری با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری دارد. یکی از دلایل این عدم انطباق را می‌توان ناشی از ناتوانی مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  در شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه دانست.

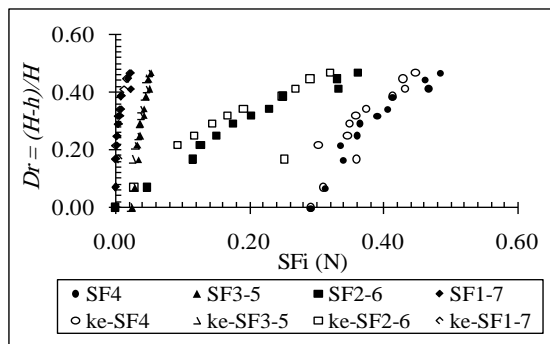
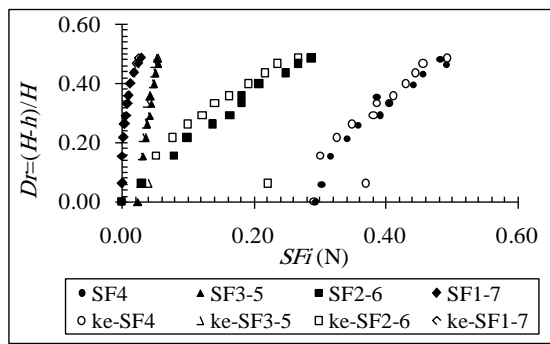
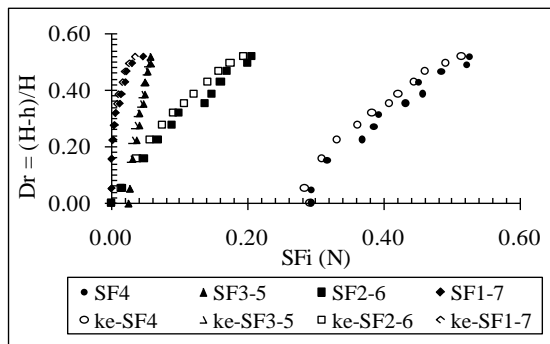
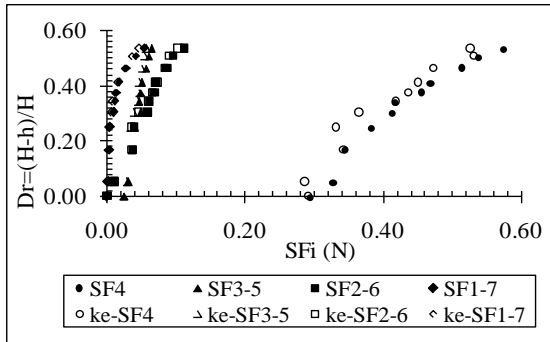
#### ۴-۳- نیروی برشی مرزی

برای اندازه‌گیری نیروی برشی مرزی، پیرامون مرطوب به علت تقارن به چهار عنصر مرزی تقسیم شده است (شکل (۱) را ببینید).

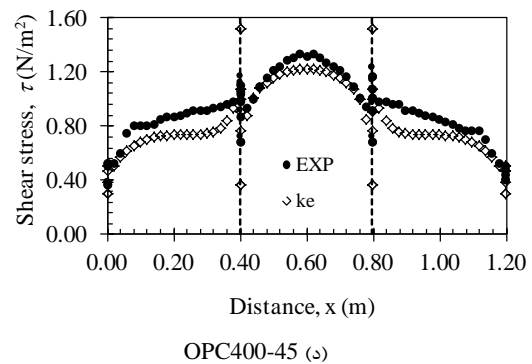
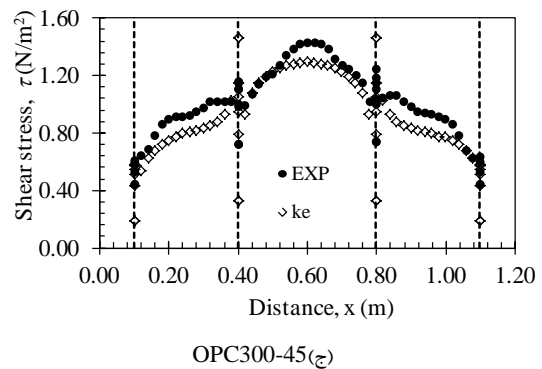
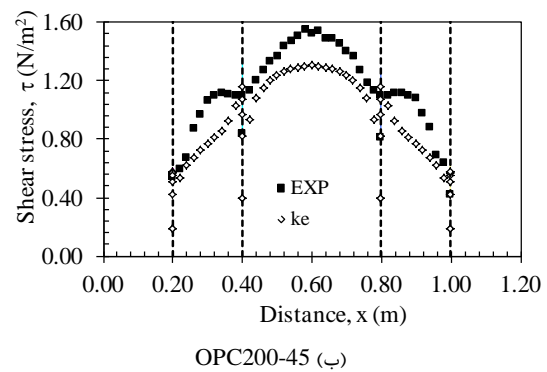
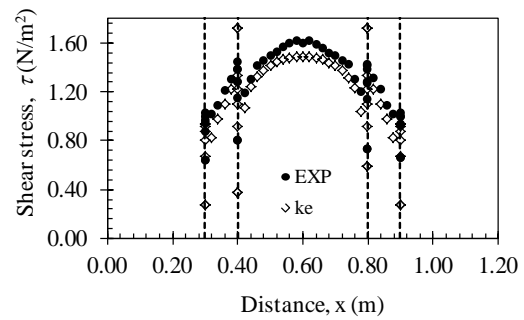


شکل ۵- منحنی دبی- اشل کانال مرکب منشوری برای عرض سیلاب‌دشت: الف) ۱۰۰، ب) ۲۰۰، ج) ۳۰۰، د) ۴۰۰ میلی‌متر

است. تغییرات نیروی برشی تحمل شده توسط هر المان در برابر عمق نسبی (Dr) در شکل (۸) ترسیم و با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری آزمایشگاهی مقایسه شده است.



شکل ۸- مقایسه نیروی برشی المان مرزی در کانال مرکب منشوری با سیلاب‌دشت‌هایی به عرض: الف) ۱۰۰، ب) ۲۰۰، ج) ۳۰۰، د) ۴۰۰ میلی‌متر



شکل ۷- توزیع تنش برشی دیواره برای دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه در سیلاب‌دشت‌هایی به عرض: الف) ۱۰۰، ب) ۲۰۰، ج) ۳۰۰، د) ۴۰۰ میلی‌متر

نیروی برشی مرزی در واحد طول (SF<sub>i</sub>) با استفاده از انتگرال‌گیری عددی تنش برشی وارد بر هر المان به دست آمده

$$\%ASF_V = \frac{ASF_V}{\rho g A_T S_w} \times 100 \quad (12)$$

و در فصل مشترک افقی می‌توان نوشت:

$$ASF_h + 2SF_3 + SF_4 = \rho g 2bhS_w \quad (13)$$

$$\%ASF_h = \frac{ASF_h}{\rho g A_T S_w} \times 100 \quad (14)$$

در روابط فوق  $ASF$  نیروی برشی ظاهری،  $2b$  پهنای کانال اصلی،  $H$  عمق جریان در کانال،  $h$  عمق کانال اصلی (۰/۰۵ متر)،  $A_T$  مساحت مقطع عرضی کل و  $S_w$  شیب میانگین سطح آب می‌باشد که به جای آن به علت یکنواختی جریان از  $S_0$  یعنی شیب کف کانال استفاده شده است. همان‌طور که پیش از این اشاره شد، با استفاده از معادلات (۱۱) و (۱۳) مقادیر نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک عمودی و افقی بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها محاسبه شده است. سپس این نیروهای برشی ظاهری به صورت درصدی از نیروی برشی کل مقطع کانال محاسبه و برای کانال مرکب با عرض سیلاب‌دشت‌های مختلف در شکل (۹) ترسیم شده است.

شکل (۹) نشان می‌دهد که درصد نیروهای برشی ظاهری در فصل مشترک عمودی با افزایش عمق نسبی ( $Dr$ ) افزایش یافته و به ازای عمق نسبی ۰/۳ به مقدار بیشینه خود می‌رسد و سپس با افزایش عمق نسبی کاهش می‌یابد. این مقدار بیشینه به هندسه فلوم بستگی دارد و با افزایش پهنای سیلاب‌دشت با روند صعودی مواجه می‌شود. مقادیر مثبت درصد نیروهای برشی ظاهری در فصل مشترک عمودی نشان می‌دهد که جریان سیلاب‌دشتی، جریان در کانال اصلی را کند می‌نماید. مقادیر درصد نیروهای ظاهری در فصل مشترک افقی بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها منفی بوده و با افزایش عمق نسبی و کاهش عرض سیلاب‌دشت‌ها مقدار مطلق آن افزایش می‌یابد که به مفهوم اثر افزایش سرعت جریان بالای فصل مشترک بر روی سرعت جریان در کانال اصلی (زیر فصل مشترک افقی) است.

در شکل (۸)، SF1-7 معرف نیروی برشی در دیواره‌های سیلاب‌دشت‌ها، SF2-6 نیروی برشی در کف سیلاب‌دشت‌ها، SF3-5 نیروی برشی در روی دیواره‌های کانال اصلی و SF4 نیروی برشی در کف کانال اصلی می‌باشد. شکل (۸) نشان می‌دهد که در کل، انطباق قابل قبولی بین توزیع نیروی برشی المان‌های مرزی حاصل از شبیه‌سازی عددی با مقادیر به دست آمده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی برقرار است. این انطباق مخصوصاً بر روی دیواره‌های کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها به طور آشکار دیده می‌شود.

#### ۴-۴- نیروهای برشی ظاهری

برای مطالعه اندرکنش بین جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، می‌توان به مطالعه تنش برشی ظاهری در فصل مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها پرداخت. بدین منظور با استفاده از معادله اندازه حرکت برای یک حجم کنترل در کانال اصلی خواهیم داشت:

$$\sum F_x = \int_{CS} \rho \beta U \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (9)$$

از آن‌جا که جریان در کانال یکنواخت است، برآیند نیروهای فشاری هیدرواستاتیکی و مقدار خالص گذر اندازه حرکت ورودی و خروجی از داخل حجم کنترل (سمت راست معادله فوق) صفر می‌باشد. پس از ساده‌سازی معادله (۹) داریم:

$$\rho g A_{mc} S_w - \tau_{mc} P_{mc} - ASF_V = 0 \quad (10)$$

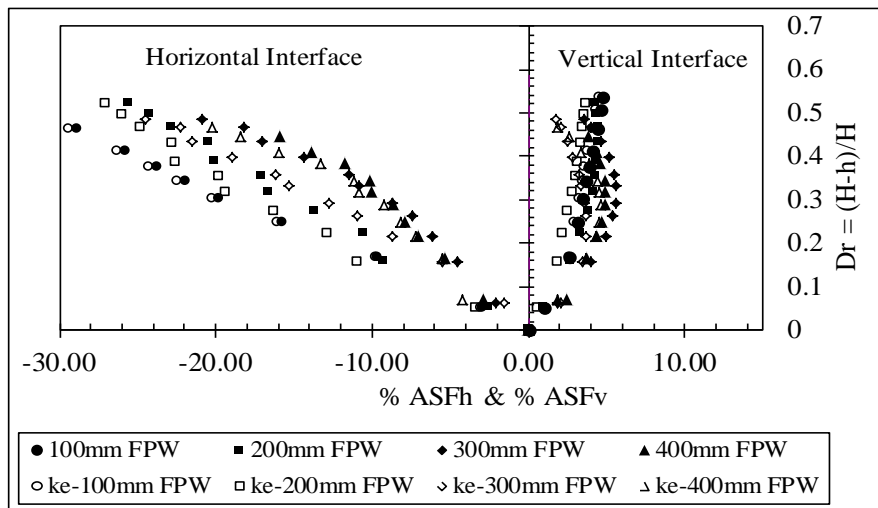
در این معادله  $\rho$  جرم مخصوص سیال،  $g$  شتاب ثقل،  $A_{mc}$  سطح مقطع جریان در کانال اصلی،  $\tau_{mc}$  متوسط تنش برشی در کانال اصلی،  $P_{mc}$  محیط ترشده کانال اصلی،  $S_w$  شیب سطح آب و  $ASF_V$  نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک عمودی بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت می‌باشند.

برای محاسبه نیروهای برشی ظاهری در عمل می‌توان سه وجه مشترک عمودی، افقی و مایل انتخاب نمود. در این تحقیق نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک عمودی و افقی محاسبه شده است (شکل (۲) را ببینید).

در فصل مشترک عمودی می‌توان نوشت:

$$2ASF_V + 2SF_3 + SF_4 = \rho g 2bHS_w \quad (11)$$





شکل ۹- مقایسه درصد نیروهای برشی ظاهری در فصل مشترک افقی و عمودی در کانال مرکب منشوری با سیلابدشت‌های به عرض ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر

##### ۵- نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی توسط مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  وجود ندارد. یکی از دلایل این امر را می‌توان ناشی از ضعف مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  در شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه دانست.

۵- با استفاده از انتگرال‌گیری عددی بر روی توزیع عرضی تنش برشی، نیروهای برشی مرزی در واحد طول تحمل شده توسط هر المان مرزی محاسبه و تغییرات آن بر حسب عمق نسبی ترسیم شده است (شکل ۸). شکل نشان می‌دهد که در کل، انطباق قابل قبولی بین توزیع نیروی برشی المان‌های مرزی حاصل از شبیه‌سازی عددی با مقادیر به دست آمده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی برقرار است. به دلیل خطای کمتر در برآورد تنش برشی، این انطباق مخصوصاً بر روی دیواره‌های کانال اصلی و سیلابدشت‌ها به طور آشکار دیده می‌شود.

۶- درصد نیروهای برشی ظاهری در فصل مشترک عمودی ( $ASFV$ ) و افقی ( $ASFh$ ) برای کانال مرکب با عرض سیلابدشت‌های مختلف محاسبه و تغییرات آن در برابر عمق نسبی ترسیم شده است (شکل ۹). علامت مثبت نیروی برشی ظاهری بیان‌گر اثر کاهش‌دهنده جریان سیلابدشت بر روی جریان در کانال اصلی می‌باشد. نیروهای برشی ظاهری در فصل مشترک افقی ( $ASFh$ ) منفی می‌باشند که نشان‌دهنده آن است که سرعت جریان ناحیه بالایی فصل مشترک بیشتر از سرعت جریان ناحیه زیرین فصل مشترک (ناحیه زیر تراز سیلابدشت در کانال اصلی) بوده و سبب شتاب حرکت این ناحیه می‌گردد.

در این تحقیق میدان جریان در کانال مرکب منشوری با سیلابدشت‌های به عرض متفاوت، با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  در نرم‌افزار محاسباتی ANSYS-CFX شبیه‌سازی عددی شده و نتایج حاصله با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید. مهم‌ترین نتایج حاصله به شرح ذیل است:

۱- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی میدان سرعت توسط مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  نشان دهنده این است که مدل فوق می‌تواند توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق را به خوبی شبیه‌سازی نماید.

۲- بررسی توزیع‌های عرضی سرعت نشان می‌دهد که در عمق‌های نسبی بالای ۰/۳ اختلاف سرعت متوسط جریان در کانال اصلی و سیلابدشت‌ها کاهش یافته، در نتیجه اندرکنش بین کانال اصلی و سیلابدشت کم می‌گردد.

۳- نسبت سرعت میانگین ناحیه‌ای کانال اصلی و سیلابدشت‌ها ( $Ui$ ) به سرعت میانگین کل ( $Uo$ ) مقطع نشان می‌دهد که نسبت سرعت متوسط در سیلابدشت به سرعت متوسط کل مقطع تابع هندسه کانال و عمق نسبی جریان است. سرعت متوسط در سیلابدشت کمتر از سرعت متوسط کل مقطع بوده ولی با افزایش عمق نسبی این دو به یکدیگر نزدیک می‌گردند.

۴- توزیع تنش برشی مرزی برای کانال مرکب منشوری با سیلابدشت‌های به عرض متفاوت به صورت عددی محاسبه و با مقادیر آزمایشگاهی آن مقایسه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که انطباق خیلی خوبی بین توزیع تنش برشی

- ۶- مراجع
- [10] Noat, D., Rodi, W., "Calculation of Secondary Currents in Channel Flow", *Journal of Hydraulic Division*, 1982, 108 (8), 948-968.
- [11] Tominaga, A., Nezu, I., "Turbulent Structure in Compound Open Channel Flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991, 117 (1), 21-40.
- [12] Cokljat, D., Younis, B., "Second Order Closure Study of Open-Channel Flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, 1995, 121 (2), 94-107.
- [13] Launder, B. E., Reece, G. J., Rodi, W., "Progress in the Development of Reynolds Stress Turbulent Closure", *Journal of Fluid Mechanics*, 1975, 68, 537-566.
- [14] MacWilliams, M. L., "Three-Dimensional Hydrodynamic Simulation of River Channels and Floodplains", PhD Thesis, Stanford University, 2004.
- [1] Sellin, R. H. J., "A Laboratory Investigation into the Interaction Between Flow in the Channel of a River and That of Floodplain", *La Houille Blanche*, 1964, 7, 793-801.
- [2] Ikeda, S., "Role of Lateral Eddies in Sediment Transport and Channel Formation", *River Sedimentation*, Jayawardena, Lee and Wang, eds., Balkema Rotterdam, 1999, 195-203.
- [3] Buosmar, D., "Flow Modeling in Compound Channels-Momentum Transfer Between Main Channel and Prismatic and Non-Prismatic Floodplains", PhD Thesis, Universite Catholique de Louvian, Belgium, 2002.
- [4] Rezaei, B., "Overbank Flow in Compound Channels with Prismatic and Non-Prismatic Floodplains", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, 2006.
- [5] Wormleaton, P. R., "Determination of Discharge in Compound Channels using The Dynamic Equation For Lateral Velocity Distribution", *International Conference on Fluvial Hydraulics*, Belgrade, Hungary, 1988, pp 98-103.
- [6] Knight, D. W., Shiono, K., Pirt, J., "Prediction of Depth Mean Velocity and Discharge in Natural Rivers With Overbank Flow", *International Conference on Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters*, (Ed. R. A. Falconer, P. Goodwin, R. G. S. Mathew), Gower Technical, University of Bradford, September, 1989, pp 419-428.
- [7] Wark, J. B., Samuel, P. G., Ervine, D. A., "A Practical Method of Estimating Velocity and Discharge in Compound Channels", *International Conference On River Flood Hydraulics*, (Edited by White, W. R.), Hydraulic Research Ltd., J. Wiley & Sons, September, 1990, pp 163-172.
- [8] Ervine, D. A., Babaeyan- Koopaei, K., Sellin, R. H. J., "Two-Dimensional Solution for Straight and Meandering Overbank Flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126 (9), 653-669.
- [9] Naot, D., Nezu, I., Nakagawa, H., "Calculation of Compound Open Channel Flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, 1993, 119 (2), 1418-1426.

**EXTENDED ABSTRACT**

## **Numerical Study on the Effects of the Floodplain Width on Flow Field and Interaction between the Main Channel and Floodplains in Prismatic Compound Channels**

Alireza Safarzadeh, Bahram Rezaei \*

*Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran*

**Received:** 08 July 2014; **Accepted:** 02 May 2016

---

**Keywords:**

Numerical study, Prismatic compound channels, Depth-averaged velocity, Boundary shear stress, Apparent shear force

---

### **1. Introduction**

Prediction of flow field in compound channel is an important task for hydraulic researches because of the three dimensional nature of the flow. In compound channels with prismatic floodplains, the main feature consists of the interaction effect between the fast moving flow in the main channel and the slow moving flow on the floodplains. This difference creates a high shear layer at the interface between the main channel and floodplains, leading to the generation of the large scale vortices with vertical axes, as well as the helical secondary with longitudinal axes, as shown by Sellin [1], Tominaga and Nezu [2], Ikeda [3], Bousmar [4] and Rezaei [5].

### **2. Methodology**

#### *2.1. Experimental model*

Experiments were carried out by Rezaei [5], using an 18 m flume at the University of Birmingham, Department of Civil Engineering. A compound channel of simple rectangular cross-section was selected and all experiments were performed in a straight flume, 1200 mm in width, 400 mm in depth and with the average bottom slope of  $S_0 = 2.003 \times 10^{-3}$ . Using PVC material, rigid and smooth boundaries were constructed both for the main channel of 398 mm width and 50 mm depth, as also for the floodplains 400 mm wide. However, for experiments in prismatic compound channels, the main channel and floodplains were isolated using L-shaped aluminium sections to make different floodplain widths, 100 mm, 200 mm, 300 mm and 400 mm.

#### *2.2. Numerical modelling*

The Reynolds Averaged Navier-Stokes equations are numerically solved using the  $\kappa$ - $\varepsilon$  turbulence model. The ANSYS-CFX software is used to predict the depth-averaged velocity and boundary shear stress in prismatic compound channels with different floodplains widths. The results of numerical modelling were then compared with the experimental data. Details of mesh gridding in section is shown in Fig. 1.

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: alirezasafarzade313@gmail.com (Alireza Safarzadeh), b.rezaei@basu.ac.ir (Bahram Rezaei).

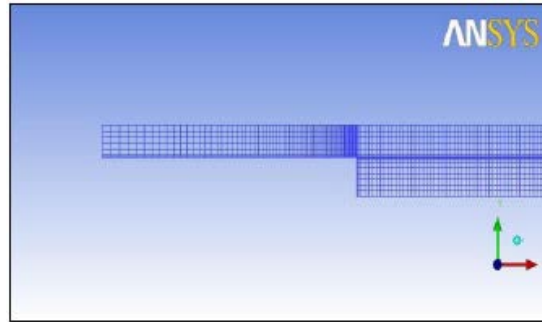


Fig. 1. Details of mesh gridding in half a section

### 3. Results and discussion

The results of study show that, more or less, there are good agreement between experiential data of depth-averaged velocity and boundary shear stress distributions and the numerical data. Also based on the momentum balance for a control volume in the main channel, the percentage apparent shear forces on the vertical and horizontal interfaces between the main channel and floodplains are calculated and shown plotted in Fig. 2.

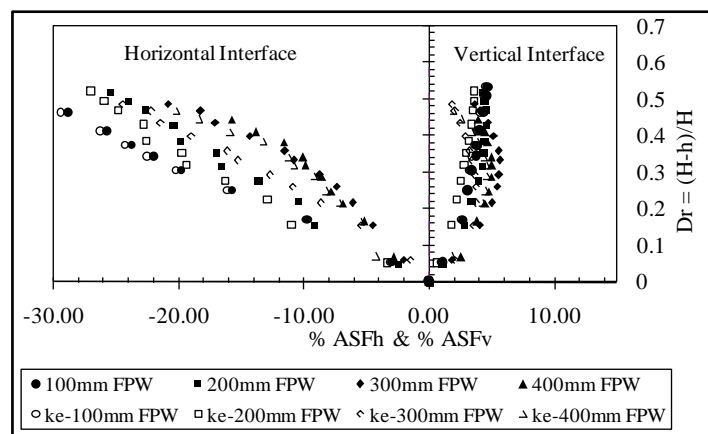


Fig. 2. Percentage apparent shear forces on the vertical and horizontal interfaces versus relative depth for the experimental and numerical modeling data

Fig. 2 shows that for prismatic compound channels, the percentage apparent shear forces on the vertical interface are always positive and increasing at low floodplain depths, reach a maximum at around a relative depth of 0.3, and then decrease for higher floodplain depths. However, this maximum value is related to the flume geometry, since as the floodplain width increases, the maximum value of the percentage of apparent shear force on a vertical interface also increases. The positive values of percentage apparent shear force on a vertical interface indicate that the slower floodplain flow retards the faster main channel flow in all cases studied herein. In the case of a horizontal interface, the absolute value of percentage of apparent shear forces increases as the relative depth and floodplain width increase. The negative values of the percentage apparent shear force on a horizontal interface indicate that the upper region of flow accelerates the flow in the lower main channel.

### 4. Conclusions

The velocity and boundary shear stress distributions in prismatic compound channels with different floodplain widths were numerical simulated using the  $\kappa$ - $\varepsilon$  turbulence model. The results of numerical modeling were then compared with the experimental data. The study shows that the  $\kappa$ - $\varepsilon$  turbulence model is able to predict the depth-averaged velocity in prismatic compound channels with different floodplain widths fairly well, especially for high relative depths. To compare with depth-averaged velocity, the shear stress distribution predicted by the numerical model is in less agreement with the experimental data. Also forces balance on the vertical interfaces indicates that, for different floodplain widths, by increasing water depths the interaction between main channel and floodplains

increase and reaches a maximum value at around a relative depth of 0.3 and then by increasing relative depth the interaction decreases.

## **5. References**

- [1] Sellin, H. J., "A Laboratory Investigation into the Interaction between Flow in the Channel of a River and That of Floodplain", *La Houille Blanche*, 1964, 7, 793-801.
- [2] Tominaga, A., Nezu, I., "Turbulent Structure in Compound Open Channel Flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991, 117 (1), 21-40.
- [3] Ikeda, S., "Role of Lateral Eddies in Sediment Transport and Channel Formation", *River Sedimentation*, Jayawardena, Lee and Wang, eds., Balkema Rotterdam, 1999, 195-203.
- [4] Bousmar, D., "Flow Modeling in Compound Channels-Momentum Transfer between Main Channel and Prismatic and Non-prismatic Floodplains", PhD Thesis, Universite Catholique de Louvian, Belgium, 2002.
- [5] Rezaei, B., "Overbank Flow in Compound Channels with Prismatic and Non-prismatic Floodplains", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, 2006.