

بررسی اثرات تغییر دبی و تغییر عرض ناحیه سیلاب‌دشت بر جریان عرضی در کانال‌های مرکب مستطیلی منشوری

مجید فضلی^{۱*} و محمدعلی کاویانی^۲

^۱ عضو هیأت علمی گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان
^۲ دانش‌آموخته دانشگاه بوعلی سینا، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

رفتار هیدرولیکی کانال‌های مرکب به دلیل اندرکنش بین کانال اصلی و سیلاب‌روها نسبت به کانال‌های ساده پیچیده‌تر می‌باشد. با توجه به تفاوت عمق جریان و تفاوت جنس در کانال اصلی و سیلاب‌رو، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در سرعت در راستای اصلی جریان بین آن‌ها وجود دارد. این اختلاف سرعت سبب تبادل ممنتوم و تشکیل جریان عرضی در کانال مرکب می‌گردد. از آن‌جا که عرض سیلاب‌دشت در کانال مرکب می‌تواند بر ابعاد و گسترش ناحیه کم سرعت اثرگذار باشد، بنابر این تغییرات عرض می‌تواند بر الگوی جریان در کانال مرکب تأثیر گذارد. جریان عرضی برخی از پارامترهای مؤثر بر الگوی جریان در این کانال‌ها را تغییر می‌دهد که می‌توان به معیارهایی همچون قدرت جریان عرضی و قدرت گردابه‌های ایجاد شده در اثر جریان عرضی اشاره نمود. در این تحقیق ابتدا الگوی جریان در کانال‌های مرکب منشوری شبیه‌سازی عددی گردیده و ضمن مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی بهترین شرایط شبیه‌سازی و نیز مدل آشفتگی مناسب پیشنهاد می‌گردد. در ادامه با تغییر عرض ناحیه سیلاب‌دشت الگوی جریان در کانال مرکب پیش‌بینی گردیده و تغییرات قدرت جریان عرضی و قدرت گردابه‌های ناشی از جریان عرضی در ناحیه اتصال کانال اصلی به سیلاب‌دشت نسبت به تغییر عرض ناحیه سیلاب‌دشت بررسی می‌گردد. همچنین با ثابت نگه داشتن ابعاد هندسی کانال مرکب و تغییر در دبی جریان، به بررسی اثر تغییرات دبی بر این پارامترهای الگوی جریان پرداخته خواهد شد.

واژگان کلیدی: کانال مرکب، مدل آشفتگی، میدان جریان، جریان عرضی، گردابه.

۱- مقدمه

این لایه برشی با افزایش آشفتگی جریان در مرز مشترک کانال اصلی و سیلاب‌رو همراه بوده و نهایتاً یک جریان عرضی^۱ تولید می‌گردد. این جریان عرضی سبب تغییراتی در اندازه حرکت جریان در کانال اصلی می‌شود. برای بررسی اثرات اندرکنش کانال اصلی بر سیلاب‌رو و بالعکس محققین بسیاری مطالعات گسترده‌ای انجام داده‌اند. [۱] Sellin برای اولین بار بیان نمود که انتقال ممنتوم بین کانال اصلی و ناحیه سیلاب‌دشت شدت جریان در کانال اصلی را کاهش و موجب افزایش شدت جریان در ناحیه سیلاب‌دشت می‌گردد. Knight و Demertrios [۲] و Stephenos و Kovlopoulos [۳] جزئیات الگوی جریان و تنش‌های برشی مرزی را در یک کانال مرکب مستطیلی بررسی نمودند. همچنین Knight و Shino [۴] نتایج تحقیقات خود را در خصوص الگوی جریان در کانال‌های مرکب با شکل‌های مختلف منتشر نمودند. علاوه بر موارد فوق‌الذکر، محققین دیگری نظیر Prinos و همکاران [۵]، Shimizu و Knight [۴]، Lamber و Sellin [۷] و نیز Sofialidis و Prinos [۸]،

یکی از جنبه‌های مهم هیدرولیک رودخانه‌ها، توزیع عرضی سرعت و تنش برشی مرزی آن‌ها است. رودخانه‌ها در بازه‌های انتهایی خود معمولاً به شکل مقطع مرکب ظاهر می‌شوند به طوری که در هنگام وقوع سیل، آب از مقطع اصلی رودخانه لبریز شده و وارد سیلاب‌دشت‌ها می‌شود. به دلیل تغییرات سریع عمق جریان و ضریب زبری بستر در ناحیه سیلاب‌دشت‌ها نسبت به کانال اصلی، توزیع عرضی سرعت و تنش برشی مرزی به طور قابل ملاحظه‌ای در کانال‌های مرکب غیر یکنواخت خواهند بود. در این شرایط مقطع اصلی به دلیل عمق جریان زیاد و ضریب زبری کم، سرعت بالایی دارد در حالی که سرعت جریان در سیلاب‌دشت‌ها، با توجه به عمق کم و زبری بیشتر، به مراتب کمتر است. این تفاوت عمق و سرعت جریان در سیلاب‌روها و کانال اصلی سبب می‌گردد که اندرکنشی بین سیلاب‌رو و کانال اصلی به وقوع بپیوندد که این اندرکنش رفتار هیدرولیکی جریان در کانال‌های مرکب را پیچیده می‌سازد. از آن‌جا که سرعت جریان در کانال اصلی با سیلاب‌روها فرق می‌کند یک لایه برشی در فصل مشترک کانال اصلی و سیلاب‌رو به وجود می‌آید.

1- Secondary flow

برای پیش‌بینی توزیع جانبی سرعت و تنش برشی در مقاطع عرضی کانال‌های مرکب منشوری توسط Knight و Shiono [۲۲]، ارائه شده بود پرداخت. همچنین Weber [۲۳] مدلی برای جریان در سیلاب‌دشت‌ها ارائه نمود. در راستای تحقیقات انجام شده با استفاده از مدل‌های عددی می‌توان مطالعات MacWilliams [۲۴] را که به ارائه مدل هیدرودینامیک سه بعدی شبیه‌سازی جریان در سیلاب‌دشت‌ها و کانال اصلی رودخانه‌ها منجر گردید نام برد. فضلی و همکاران جریان در کانال‌های مرکب منشوری را به صورت دو فازی (آب و هوا) شبیه‌سازی نمودند [۲۸]. صفارزاده نیز جریان در کانال‌های مرکب منشوری با سیلاب‌دشت‌های به عرض متفاوت را شبیه‌سازی نمود [۲۹].

برای ترکیب پارامترهای الگوی جریان در کانال‌های قوسی با کانال‌های مرکب نیز مطالعات گسترده‌ای در زمینه کانال‌های مرکب مارپیچی صورت گرفته است. در این راستا می‌توان به مطالعات Toebes و Sooky اشاره کرد. آن‌ها تلاش کردند تا ارتباط بین افت انرژی ناشی از ساختار جریان‌های داخلی و اندرکنش کانال اصلی و سیلاب‌دشت را بیان نمایند [۲۵].

جریان عرضی به غیر از کانال‌های مرکب در قوس رودخانه‌ها و کانال‌ها نیز رخ می‌دهد که در این زمینه محققین مختلفی به تحقیق پرداخته و برای ارزیابی جریان عرضی معیارهایی ارائه نموده‌اند که از آن جمله می‌توان دو معیار قدرت جریان عرضی^۱ و قدرت گردابه‌های ناشی از جریان عرضی^۲ را نام برد. کاربرد این دو معیار برای جریان عرضی در کانال‌های مرکب تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است. لذا در این تحقیق ابتدا الگوی جریان در کانال‌های مرکب منشوری شبیه‌سازی عددی گردیده و ضمن مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی بهترین شرایط شبیه‌سازی و نیز مدل آشفتگی مناسب پیشنهاد می‌گردد. در ادامه، تغییرات قدرت جریان عرضی و قدرت گردابه‌های ناشی از جریان عرضی در ناحیه اتصال کانال اصلی به سیلاب‌دشت مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با تغییر عرض ناحیه سیلاب‌دشت الگوی جریان در کانال مرکب پیش‌بینی گردیده و تغییرات پارامترهای مذکور نسبت به تغییر عرض ناحیه سیلاب‌دشت بررسی می‌گردد. همچنین با ثابت نگه داشتن ابعاد هندسی کانال مرکب و تغییر در دبی جریان، به بررسی اثر تغییرات دبی بر این پارامترهای الگوی جریان خواهیم پرداخت.

ساختار توربولانس و آشفتگی را در کانال‌های مرکب مورد مطالعه قرار داده‌اند. تحقیقات قابل توجهی نیز بر روی مدل‌های فیزیکی برای بررسی رفتار جریان در کانال‌های مرکب با عرض‌های متفاوت کانال اصلی و سیلاب‌دشت انجام شده است که مشهورترین این تحقیقات در مؤسسه SERC در انگلیس و توسط Knight و Shiono [۹]، Lyness و Myers [۱۰] صورت پذیرفته است. این تحقیقات در فهم الگوی پیچیده جریان و تنش‌های برشی مرزی که عوامل انتقال ممنتوم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت می‌باشد کمک بسیاری نموده است. Myers و Lyness [۱۰] در خصوص نسبت دبی‌های کانال مرکب تحقیقاتی انجام دادند. آن‌ها دو نسبت کلیدی مهم برای بیان رفتار جریان ارائه نمودند. این دو نسبت عبارت از نسبت دبی کل به دبی حالت پر کانال اصلی و نسبت دبی کانال اصلی به دبی سیلاب‌دشت بود. Tominaga و Nezu [۱۱] و Naot و همکاران [۱۲] دریافتند که جریان ثانویه تولید شده در ناحیه اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت اثرات بسیار قابل توجهی بر انتقال ممنتوم و تنش برشی مرزی دارد. Knight و Demetrious [۳] درصد تأثیر ناحیه سیلاب‌دشت در نیروی برشی از کل نیروی برشی در کانال‌های مرکب را طی روابطی ارائه نمودند. توزیع تنش برشی مرزی، توزیع سرعت و مقاومت جریان در کانال‌های مرکب به وسیله محققینی همچون Ghosh و Jena [۱۳]، Myers و Elsayy [۱۴]، Knight و Rhodes [۱۵]، Patra و Kar [۱۶]، Knight و Lai [۱۷]، و Myers و Brennan [۱۸]، مورد بررسی قرار گرفته است.

ضرورت انجام تحقیقات با استفاده از مدل‌های عددی نیز همواره به عنوان گزینه‌ای برای کسب نتایج کاربردی در کانال‌های مرکب مورد توجه واقع گردیده است. لذا تاکنون مدل‌های ریاضی زیادی توسط محققین مختلف برای حل تحلیلی و عددی توزیع عرضی سرعت در مقاطع مرکب ارائه شده‌اند. به طوری که رفتار هیدرودینامیکی کانال‌های مستطیلی مرکب از طریق مدل عددی توسط Naot و Nez [۱۲] با در نظر گرفتن مدل آشفتگی (ASM) ارزیابی گردید. Lee و همکاران [۱۹] با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی توزیع سرعت نشان دادند که مدل آشفتگی همانند مدل طول اختلاط Lambert و Sellin [۲۰]، برای پیش‌بینی سرعت ناحیه‌ای، از توانایی بیشتری در برآورد عدد فرود نواحی مختلف کانال مرکب، در مقایسه با روش تقسیم کانال Lotter (DCM) برخوردار است. Abril [۲۱]، با استفاده از روش اجزاء محدود به بررسی روش تحلیلی SKM که

1- Power of secondary flow

2- Vorticity

سمت مخزن تغذیه نصب گردیده بود، اندازه‌گیری می‌شد. توزیع سرعت در مقطع جریان در ۱۴ متری از شروع کانال با استفاده از یک سرعت‌سنج پروانه‌ای مینیاتوری از نوع Novar Nixon با دقت ۰/۲۸۰ متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است.

۳- شبیه‌سازی عددی

۳-۱- مشخصات میدان جریان

میدان جریان مدل شده کانال مرکبی است که دارای ۱۸ متر طول، عرض ثابت ۴۰ سانتی‌متر برای مقطع اصلی و عرض‌های متغیر ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر برای سیلاب دشت‌ها می‌باشد. از آن‌جا که برای صحت‌سنجی، نتایج می‌باید با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌گردید، لذا از دبی‌های ۳۰ و ۴۵ لیتر بر ثانیه برای عرض سیلاب دشت ۱۰ سانتی‌متر که داده‌های میدان جریان آن (سرعت جریان در امتداد طولی کانال) در دسترس بود، استفاده گردید.

۳-۲- معادلات حاکم بر میدان جریان

معادلات حاکم بر جریان سیال در حالت آشفته شامل معادلات بقاء جرم و ممنتوم می‌باشد. با فرض دائمی بودن جریان $(\frac{\partial}{\partial t} = 0)$ و نیز صرف‌نظر کردن از نوسانات جرم مخصوص $(\rho' = 0)$ ، این معادلات به صورت زیر بیان می‌شوند.
معادله پیوستگی:

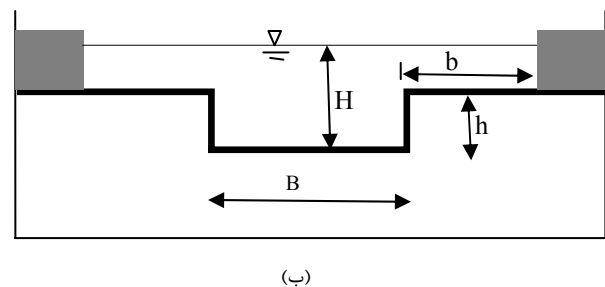
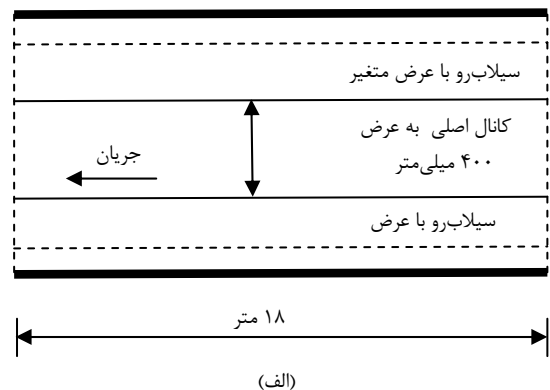
$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (2)$$

در معادلات فوق، u مؤلفه سرعت، ρ چگالی سیال و p فشار کل می‌باشد. همچنین در معادله (۲)، جملات $-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j'$ به عنوان تنش‌های رینولدز شناخته می‌شوند. با ملاحظه روابط (۱) و (۲) مشاهده می‌گردد که این روابط از سه معادله اندازه حرکت و یک معادله پیوستگی تشکیل شده‌اند و ۱۰ مجهول وجود دارد (u, v, w, p) و شش مؤلفه تنش رینولدز). در نتیجه میدان معادلات حاکم بر جریان بسته نبوده و لازم است تا تنش‌های رینولدز با روش ریاضی مدل‌سازی شوند. لذا برای بستن سیستم

۲- تجهیزات آزمایشگاهی و آزمایش‌های انجام شده

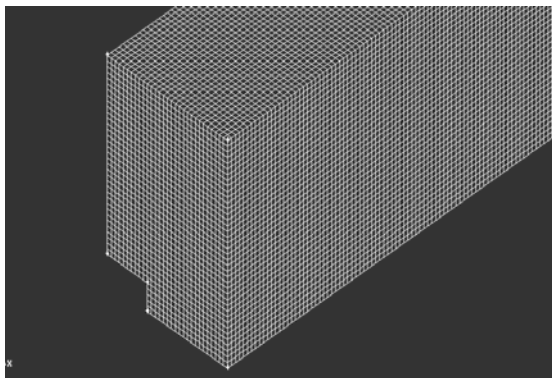
فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق، یک کانال تحقیقاتی به طول ۱۸ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه بیرمنگام انگلستان است. این کانال، کانال مرکبی با مقطع مستطیل به طول ۱۸ متر، عرض ۱۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد. شیب این کانال $2/0.03 \times 10^{-3}$ می‌باشد. در شکل (۱-الف) پلان و در شکل (۱-ب) مقطع عرضی کانال نشان داده شده است. مقطع کانال با استفاده از صفحات PVC به صورت مقطع مرکب مستطیلی در آمده است که عرض کانال اصلی آن تقریباً ۴۰۰ میلی‌متر و عمق ۵۰ میلی‌متر در مرکز کانال و دو ناحیه سیلاب‌رو به عرض ۴۰۰ میلی‌متر در طرفین آن قرار گرفته است که عرض آن‌ها قابل تنظیم به عرض دلخواه می‌باشد. برای انجام این تحقیق عرض سیلاب‌روها ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر انتخاب گردید. در انتهای کانال تحقیقاتی، سه دریچه کشویی برای ایجاد جریان یکنواخت نصب گردیده است.



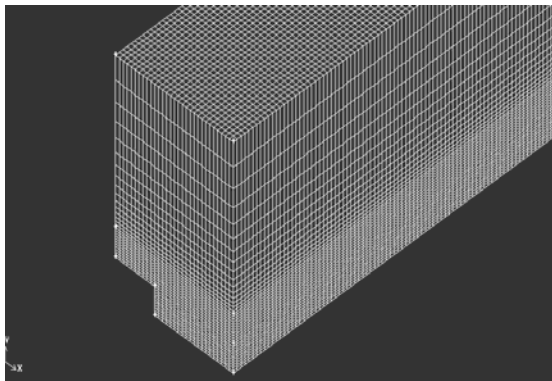
شکل ۱- الف) پلان و ب) مقطع کانال تحقیقاتی

آزمایش‌ها برای هر حالت عرضی سیلاب‌رو، با ۱۲ دبی مختلف در محدوده ۰/۱۰۶۰ تا ۰/۰۵۰ متر مکعب بر ثانیه با رشد ۰/۳۰۰ و ۰/۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه انجام پذیرفته است. دبی جریان در کانال با استفاده از یک ونتوری‌متر و یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی که بر روی لوله خروجی جریان از کانال به

راستا با فواصل یکسان در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهند که اگرچه سرعت طولی حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی انطباق مناسبی دارد، اما تعداد المان‌ها برای محاسبه سرعت‌های عرضی کم می‌باشد. در شکل (۲) نمونه‌ای از این نوع مش‌بندی نشان داده شده است. برای پیش‌بینی بهتر سرعت‌های عرضی، اصلاح مش‌بندی قبلی صورت گرفته و در مش‌بندی دوم، در ناحیه سیلاب‌دشت تعداد المان‌ها دو برابر گردید. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، این اقدام باعث بهبود نتایج سرعت‌های عرضی گردید. لیکن در نتایج سرعت‌های طولی تغییر معناداری حاصل نشد. در مش‌بندی نوع دوم، اگرچه نتایج بهتری حاصل می‌گردد اما برای کاهش زمان محاسبه و برای شبیه‌سازی فاز آب و فاز هوا، مش‌بندی صورت گرفته تا ارتفاع H (عمق جریان) ریزتر در نظر گرفته شده است و مش‌بندی در قسمت فاز هوا به صورت لگاریتمی به نحوی انتخاب شده است تا المان‌های نزدیک به سطح آب همچنان به همان ریزی قسمت فاز آب باشد و با فاصله گرفتن از سطح آب و کم اهمیت‌تر شدن اندازه المان‌ها، به منظور صرفه‌جویی در زمان، اندازه المان‌ها نیز بزرگ‌تر شود. نمونه‌ای از این نوع مش‌بندی در شکل (۲) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲- الف) مش‌بندی یکسان با فواصل یک سانتی‌متر
ب) مش‌بندی نوع دوم با فواصل یکسان در فاز آب و فواصل لگاریتمی در فاز هوا

معادلات حاکم، از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌شود. در مورد دیواره‌ها نیز با بررسی شرایط آزمایشگاهی ضریب زبری معادل لوله‌های PVC در نرم‌افزار در نظر گرفته شده و شرایط آن نیز بدون لغزش منظور گردید. همچنین به منظور سهولت مدل‌سازی، شیب کف به جای اعمال در مدل هندسی در شرایط مرزی پروژه اعمال شد. به منظور شبیه‌سازی عددی جریان از نرم‌افزار ANSYS CFX 12.0 استفاده گردیده است. این نرم افزار قابلیت شبیه‌سازی انواع گوناگون جریان‌های آشفتگی را با استفاده از مدل‌های متنوع آشفتگی دارا می‌باشد؛ از جمله مدل‌های آشفتگی مبتنی بر لزجت گردابه‌ای و مدل‌های آشفتگی مبتنی بر تنش‌های رینولدز، که در این تحقیق این دو گروه از مدل‌های آشفتگی برای شبیه‌سازی جریان در کانال‌های مرکب یا هم مقایسه شده‌اند.

۳-۳- مقایسه روش‌های VOF و Rigid Lid برای شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد

به طور کلی بر شبیه‌سازی سطح آزاد دو نگرش کلی حاکم است. در نگرش اول معادلات حاکم بر جریان فقط برای فاز آب حل می‌شوند. روش Rigid Lid که در آن میدان جریان فقط شامل فاز آب است و با اعمال شرایط مرزی تقارن در سطح آزاد شبیه‌سازی صورت می‌گیرد، در این نگرش قرار دارد. ولی در نگرش دوم معادلات حاکم برای آب و هوا حل می‌شوند و مرز آب و هوا به عنوان محلی که تغییرات شدیدی در خواص سیال رخ می‌دهد شناخته می‌شوند. در این نگرش سطح آزاد با سلول‌هایی که از دو سیال پر شده است مشخص می‌گردند. روش VOF در این نگرش قرار می‌گیرد. روش‌های مبتنی بر نگرش اول معمولاً ساده‌تر هستند و به زمان محاسباتی کمتری نیاز دارند. در حالی که در نگرش دوم علاوه بر معادلات حاکم برای فاز آب، نیازمند حل معادلات اضافی دیگری نیز می‌باشد. لذا معمولاً این روش تحلیل پیچیده‌تر و به لحاظ زمانی، به زمان بیشتری نیاز دارند. در این تحقیق نتایج شبیه‌سازی جریان در کانال مرکب منشوری با استفاده از هر دو روش VOF و Rigid Lid انجام و نتایج حاصله با هم مقایسه گردید.

۳-۴- تنظیم شبکه میدان حل

برای تحلیل میدان جریان، شبکه میدان حل به دو صورت انجام شد. ابتدا با تأمین شرط $11.25 < y^+ = (y1u^*/v) < 30$ که $y1$ فاصله اولین گره در جهت عمود بر دیواره و y^+ پارامتر بدون بعد آن است. فاصله خطوط شبکه در میدان جریان در هر سه

۳-۵-۵- شرایط حاکم بر مدل سازی

۳-۵-۱- شرایط مرزی

از آنجایی که در نتایج آزمایشگاهی موجود دبی، برای مقاطع مختلف مشخص است، برای مدل سازی بهتر و همچنین نزدیک تر کردن هرچه بیشتر مدل سازی به واقعیت، از شرایط مرزی ورودی Mass flow inlet یا همان دبی جرمی ورودی استفاده شده است و از تقسیم دبی بر سطح مقطع به منظور به دست آوردن سرعت متوسط و اعمال شرایط مرزی سرعت ورودی ثابت یا Velocity inlet پرهیز شده است (چرا که سرعت در قسمت ورودی جریان برای نقاط مختلف یک مقدار ثابت نمی باشد). برای دبی جرمی ورودی هوا نیز با فرض برابر بودن سرعت هر دو فاز در سطح تماس آب و هوا و همچنین انجام یک پروسه سعی و خطا، روند انتخاب و تعیین دبی جرمی ورودی هوا مشخص گردید. برای شرایط مرزی در ورودی بالا دست میدان برای پارامترهای سرعت و آشفتگی از شرط مرزی دیرکله استفاده شده است. استفاده از شرط مرزی دیرکله به این معنا است که مقادیر متغیرها در مرز معین می باشد. در مرز خروجی برای تمام متغیرها شرط مرزی گرادیان صفر اعمال می شود. حال با توجه به ماهیت شرط مرزی مزبور مبنی بر عدم تغییر مشخصات جریان در جهت عمود بر این مرز، لازم است تا موقعیت این مرز برای حصول شرط فوق در راستای کانال خروجی پایین دست تعیین شود. اعمال این شرط در مدل، با دادن دبی و سطح آب در پایین دست اعمال می شود.

جدول ۱- مدل های مختلف آشفتگی استفاده شده برای

شبیه سازی عددی

$k - \epsilon$
RSM
BSL
BSL EARSM
K-Omega
Eddy Viscosity Transport Eq.
Shear Stress Transport
BSL Reynolds Stress
LRR Reynolds Stress
Omega Reynolds Stress
QI Reynolds Stress
RNG $k - \epsilon$
SSG Reynolds Stress

۳-۵-۲- مدل آشفتگی

در این تحقیق برای مدل سازی آشفتگی از ۱۴ مدل آشفتگی موجود در نرم افزار ANSYS CFX، مدل صفر معادله ای به علت دقت کم کنار گذاشته شده و با استفاده از ۱۳ مدل باقی مانده شبیه سازی سرعت جریان و تنش برشی در مقطع کانال انجام پذیرفت. در جدول (۱) مدل های مختلف آشفتگی استفاده شده، ارائه گردیده اند.

۳-۶- معیارهای ارزیابی جریان عرضی

۳-۶-۱- قدرت جریان عرضی

برای بررسی قدرت جریان عرضی از سوی محققین مختلف معیارهای متفاوتی ارائه گردیده است. Shukry با انجام مطالعاتی بر روی جریان در قوس رودخانه، ضمن تشریح مکانیسم جریان عرضی، معیار زیر را برای قدرت جریان عرضی معرفی کرده است [۲۶]:

$$S_{xy} = \frac{K_{lateral}}{K_{main}} \quad (3)$$

این معیار در یک مقطع عرضی معین عبارت است از نسبت انرژی جنبشی جریان جانبی به انرژی جنبشی جریان اصلی و با رابطه ذیل تعریف می شود:

$$s_{xy} = \frac{\left(\frac{V_{xy}^2}{2g} \right)}{\left(\frac{V^2}{2g} \right)} \quad (4)$$

که در این رابطه:

$$V_{xy} = (u^2 + v^2)^{0.5} \quad (5)$$

$$V = (u^2 + v^2 + w^2)^{0.5} \quad (6)$$

u ، v و w مؤلفه های سرعت در امتداد x ، y و z بوده و g نیز شتاب گرانش است. در ادامه این مقاله، قدرت جریان عرضی در مقاطع عرضی کانال های مرکب منشوری با عرض سیلاب دشت- های مختلف و دبی های متفاوت محاسبه و مقایسه شده است.

$$\bar{\omega}_z = \frac{1}{2}(\nabla^* q) \quad (۸)$$

در رابطه (۸) عبارت $\zeta = \nabla^* q$ کرل بردار سرعت بوده و به Vorticity معروف است. این عبارت به عنوان معیار قدرت جریان عرضی معرفی شده است. برای جریان در دستگاه مختصات استوانه‌ای، با توجه به شکل (۳)، می‌توان $\bar{\zeta}_\theta$ را به صورت معادله (۹) نوشت:

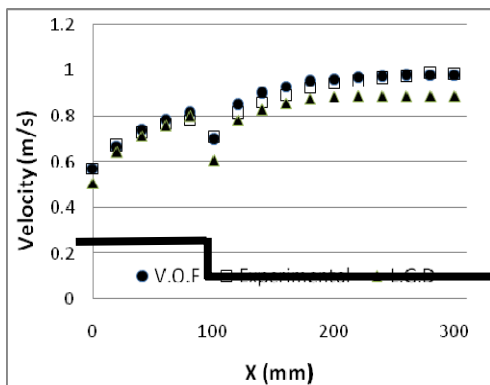
$$\bar{\zeta}_\theta = \left(\frac{\partial V_y}{\partial r} - \frac{\partial V_r}{\partial y} \right) \quad (۹)$$

که در این رابطه V_r و V_y به ترتیب مؤلفه‌های سرعت قائم و سرعت شعاعی و $\bar{\zeta}_\theta$ مقدار چرخش در مقطع عرضی می‌باشد. به منظور بررسی روند تغییرات پارامتر Vorticity به عنوان معرف قدرت جریان عرضی، این پارامتر در مقاطع عرضی کانال-های مرکب منشوری با عرض سیلاب‌دشت‌های مختلف و دبی-های متفاوت محاسبه و مقایسه شده است.

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- نتایج مقایسه روش‌های VOF و Rigid Lid برای شبیه‌سازی جریان‌های سطح آزاد

همان‌گونه که قبلاً بیان گردید، در این تحقیق نتایج شبیه‌سازی جریان در کانال مرکب منشوری با استفاده از هر دو روش VOF و Rigid Lid انجام و نتایج حاصله با هم مقایسه گردیدند. این مقایسه در شکل (۴) برای کانال مرکبی با عرض سیلاب‌دشت ۱۰ سانتی‌متر و دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است.



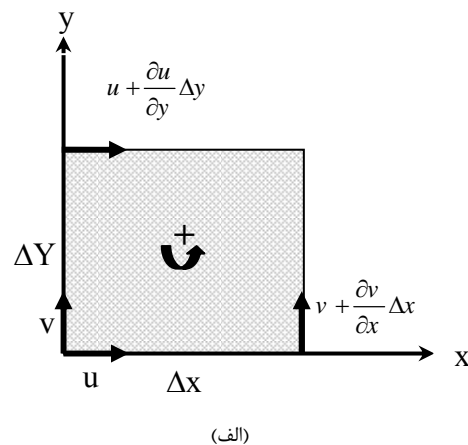
شکل ۴- مقایسه سرعت طولی حاصل از شبیه‌سازی عددی با روش VOF و Rigid Lid با نتایج آزمایشگاهی

۳-۶-۲- معیار قدرت چرخشی گردابه

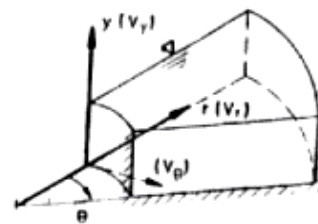
معیار مهم و تئوریک دیگری که برای قدرت جریان عرضی در مراجع بدان اشاره شده است، معیار Vorticity می‌باشد. طبق تعریف، نرخ خالص چرخش پادساعتگرد یک المان به ابعاد $\Delta x \times \Delta y$ حول محور Z (متوسط مجموع چرخش وجوه Δx و Δy)، چرخش^۱ نامیده شده و با توجه به شکل (۳) به صورت معادله (۷) قابل بیان است.

$$\bar{\omega}_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (۷)$$

در این رابطه، $\bar{\omega}_z$ مقدار چرخش حول محور z ، u و v مؤلفه‌های سرعت در امتداد محورهای x و y می‌باشند.



(الف)



(ب)

شکل ۳- (الف) دیاگرام چرخش یک المان حول محور z، (ب) مؤلفه‌های سرعت در دستگاه مختصات استوانه‌ای

به همین ترتیب می‌توان چرخش حول سایر محورها را تعریف کرد و بردار برآیند نرخ چرخش را به صورت معادله (۸) ارائه کرد:

جدول ۲- مقایسه درصد خطای مدل‌های مختلف آشفتگی

نسبت به نتایج آزمایشگاهی صفارزاده [۲۹]

درصد خطای تنش برشی متوسط دیواره مقطع	درصد خطای	مدل های آشفتگی
۱/۳۱	۹/۶۲	$k-\varepsilon$
۰/۵۸	۱/۴۶	RSM
۱/۱۷	۷/۸۷	BSL
۰/۷۵	۵/۴۱	BSL EARSM
۱/۱۸	۷/۹۷	K-Omega
۱/۵۳	۱/۵۹	Eddy Viscosity Transport Eq.
۰/۹۹	۹/۴	Shear Stress Transport
۰/۷۸	۱۱/۱۱	BSL Reynolds Stress
۰/۷	۱۶/۱۲	LRR Reynolds Stress
۰/۷۸	۱۱/۲۵	Omega Reynolds Stress
۰/۸۷	۱۷/۲۴	QI Reynolds Stress
۱/۳۸	۲۴/۹۴	RNG $k-\varepsilon$
۰/۹۵	۱۷/۲۵	SSG Reynolds Stress

۴-۳- مقایسه نتایج تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی

سرعت عرضی

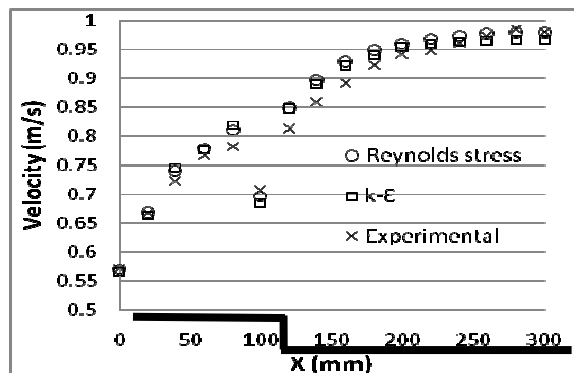
قبلاً اشاره گردید که به دلیل تفاوت سرعت جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت همواره جریان‌های عرضی در کانال مرکب قابل انتظار می‌باشد. برای بررسی و مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف آشفتگی، نتایج حاصله به طور کیفی با نتایج ارائه شده shiono و همکاران [۲۷] مقایسه گردید. در شکل (۶) نتایج سرعت عرضی و گردابه‌های ایجاد شده ناشی از جریان‌های عرضی برای دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و Reynolds stress models ارائه شده است. در شکل (۷) نیز نتایج آزمایشگاهی خطوط جریان و جریان عرضی اندازه‌گیری شده shiono و همکاران [۲۷] ارائه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، در مقطع عرضی سه جریان گردابی قابل تشخیص می‌باشد. با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مدل‌های مختلف آشفتگی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری می‌توان نتیجه گرفت که در بین مدل‌های آشفتگی، نتایج حاصل از مدل تنش‌های رینولدز جواب‌های بهتری در انطباق با جریان عرضی در کانال مرکب نشان می‌دهد.

چنان‌که در این شکل مشاهده می‌گردد، نتایج سرعت طولی به دست آمده از روش VOF در مقایسه با روش Rigid Lid به ویژه در قسمت اصلی کانال مرکب، به مراتب به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر هستند. لذا در ادامه تحقیق از روش VOF برای شبیه‌سازی استفاده شده است.

۴-۲- نتایج مقایسه مدل‌های آشفتگی

همان‌گونه که قبلاً بیان گردید، در این تحقیق برای مدل‌سازی آشفتگی از ۱۳ مدل آشفتگی موجود در نرم‌افزار ANSYS CFX با انتخاب دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه در کانال مرکب منشوری با سیلاب‌دستی به عرض ۴۰۰ میلی‌متر شبیه‌سازی سرعت جریان و تنش برشی در مقطع کانال انجام پذیرفته و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. در جدول (۲) درصد خطای هر یک از مدل‌های آشفتگی نسبت به نتایج آزمایشگاهی سرعت و تنش برشی ارائه شده است. همچنین صفارزاده [۲۹] نیز ضمن مطالعات خود درصد خطای هر یک از مدل‌های آشفتگی نسبت به نتایج آزمایشگاهی سرعت و تنش برشی را ارائه نمود جدول (۲). همچنین نتایج مقایسه شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و RSM در شکل (۵) برای کانال مرکبی با عرض سیلاب‌دشت ۱۰ سانتی‌متری و دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه نشان داده شده است.

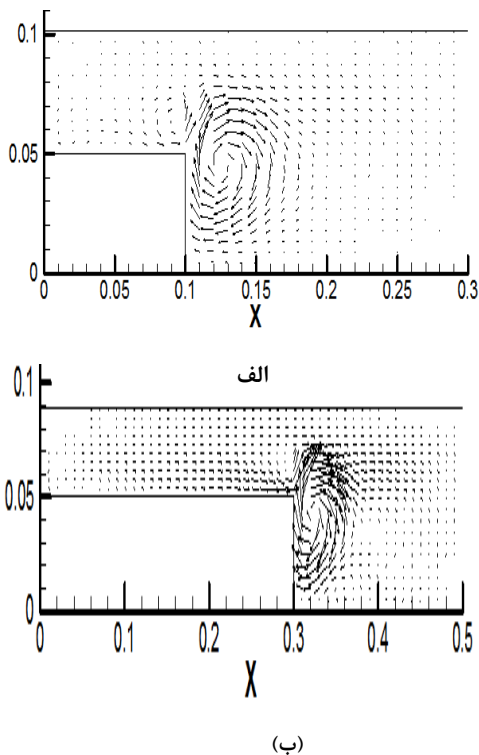
همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌گردد، در ناحیه سیلاب‌دشت تفاوت معنی‌داری بین نتایج حاصل از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد با مدل RSM موجود نمی‌باشد. لیکن در ناحیه اصلی کانال مرکب و به ویژه در نواحی مرکزی این قسمت نتایج حاصل از مدل RSM به برداشت آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. با توجه به نتایج مندرج در جدول (۲)، روش RSM به عنوان روش مناسب شبیه‌سازی جریان در کانال مرکب منشوری انتخاب گردید.



شکل ۵- مقایسه سرعت طولی حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل‌های آشفتگی مدل $k-\varepsilon$ استاندارد و مدل RSM

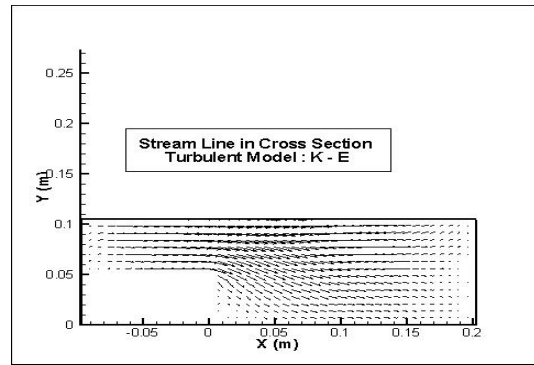
۴-۴- تغییرات عرض سیلابدشت و اثر آن بر الگوی جریان

در شکل (۸) الگوی جریان در مقاطع عرضی واقع در ۱۴ متری از ورودی کانال مرکب منشوری حاصل از مدل آشفتگی RSM به روش VOF و برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه ارائه گردیده است.

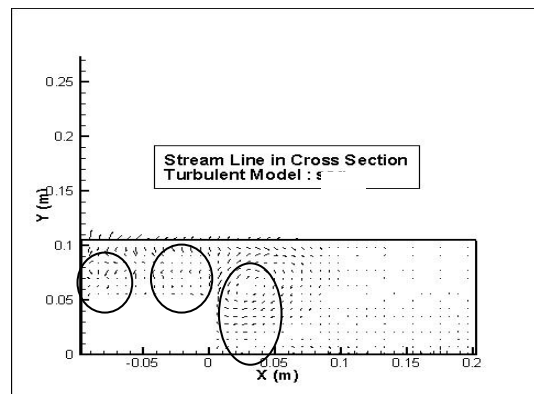


شکل ۸- مقایسه سرعت عرضی حاصل از شبیه سازی عددی برای عرض های مختلف سیلابدشت عرض های (الف) ۱۰، (ب) ۳۰ سانتی متر

این نتایج برای عرض های مختلف ناحیه سیلابدشت (۱۰ و ۳۰ سانتی متر) ارائه گردیده است. در این شکل ملاحظه می گردد که در ناحیه اتصال قسمت اصلی کانال مرکب به ناحیه سیلابدشت به دلیل تفاوت سرعت طولی جریان، تبادل ممنومی بین ناحیه اصلی کانال و ناحیه سیلابدشت به وقوع پیوسته است که در نتیجه آن جریان عرضی به صورت یک گردابه شکل می گیرد. اما با پیگیری روند تشکیل گردابه در این ناحیه مشاهده می گردد که با افزایش عرض ناحیه سیلابدشت قدرت گردابه در محل اتصال افزایش می یابد به طوری که گردابه تشکیل شده برای عرض ۳۰ سانتی متری سیلابدشت نسبت به عرض ۱۰ سانتی متری آن قدرت گردابه افزایش قابل توجهی یافته است. این موضوع نشان می دهد که علی رغم بالاتر بودن سرعت طولی در کانال مرکب با سیلابدشت ۱۰ سانتی متری در ناحیه اصلی و

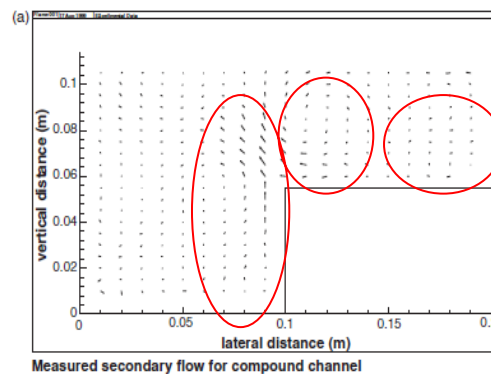
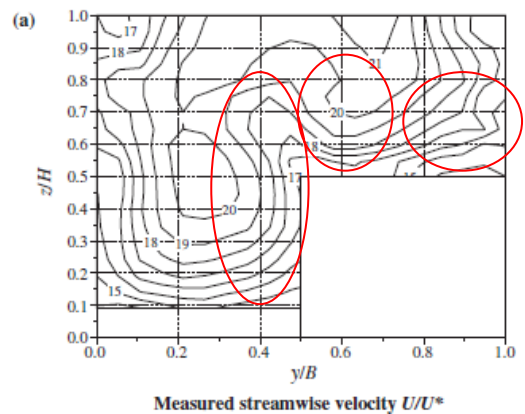


(الف)

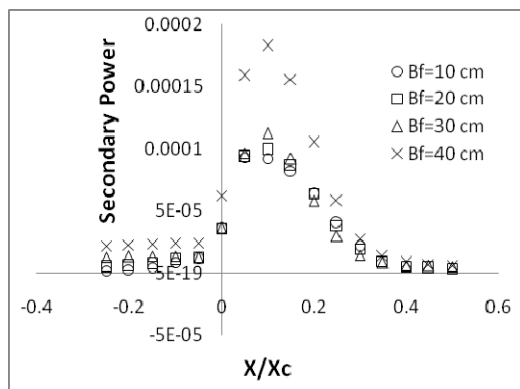


(ب)

شکل ۶- تشکیل جریان های عرضی و گردابه ها در مدل های مختلف آشفتگی: (الف) مدل $k-\epsilon$ ، (ب) Reynolds stress model



شکل ۷- خطوط جریان و جریان عرضی اندازه گیری شده در کانال مرکب shiono و همکاران [۲۷]



شکل ۹- مقایسه قدرت جریان عرضی برای چهار عرض مختلف سیلابدشت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری و عرض یکسان کانال اصلی در دبی ثابت ۴۰ lit/s

با در نظر گرفتن تفاوت قابل توجه سرعت‌های طولی در کانال اصلی و سیلابدشت انتظار داشتن قوی‌ترین جریان عرضی در محل اتصال کانال اصلی با سیلابدشت قابل پیش‌بینی است، که این مطلب به خوبی در شکل (۹) ملاحظه می‌گردد. همچنین با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌گردد که با افزایش عرض ناحیه سیلابدشت در شرایطی که عرض کانال اصلی ثابت باقی بماند قدرت جریان عرضی نیز در کانال اصلی و ناحیه سیلابدشت افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع را می‌توان چنین بیان نمود که با توجه به ثابت بودن دبی و ابعاد کانال اصلی، با افزایش عرض ناحیه سیلابدشت سرعت طولی جریان در سیلابدشت به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد در حالی که کاهش سرعت در ناحیه کانال اصلی در این حد نبوده و لذا تفاوت سرعت طولی در ناحیه سیلابدشت و کانال اصلی با افزایش عرض یافته و افزایش بیشتر تفاوت سرعت در این دو ناحیه افزایش تبادل ممنوم و در نتیجه افزایش جریان عرضی را به دنبال خواهد داشت، این افزایش جریان عرضی با افزایش قدرت جریان عرضی همراه است که این مطلب با توجه به شکل (۹) به خوبی قابل استنتاج است. برای بررسی اثر دبی جریان بر روی جریان عرضی، با ثابت نگه داشتن ابعاد هندسی کانال اصلی (عرض ثابت ۴۰ سانتی‌متری) و ناحیه سیلابدشت (عرض ثابت ۱۰ سانتی‌متری)، برای ۳ دبی ۱۵، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه، قدرت جریان عرضی محاسبه گردید. شکل (۱۰) تغییرات قدرت جریان عرضی بر حسب فاصله از محل اتصال کانال اصلی و سیلابدشت را که با روند شرح داده شده قبلی محاسبه و ترسیم گردیده است نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، در صورتی که ابعاد هندسی کانال مرکب ثابت باقی‌بماند، از آن‌جا که

ناحیه سیلابدشت، گردابه تشکیل شده از قدرت کمتری برخوردار است. به نظر می‌رسد که علت این موضوع را می‌توان در افزایش عمق جریان برای دبی ثابت با کاهش عرض ناحیه سیلابدشت دانست.

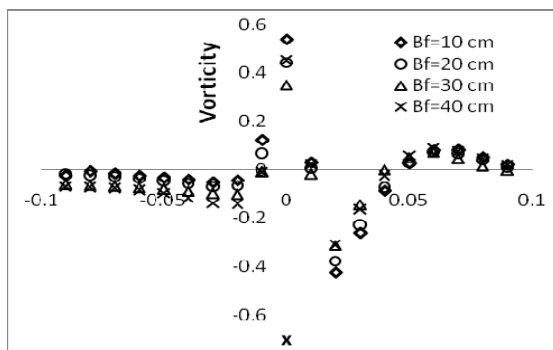
۴-۴-۱- تغییرات قدرت جریان عرضی برای عرض‌های مختلف سیلابدشت

از آن‌جا که در کانال‌های مرکب منشوری وقوع جریان عرضی قابل توجه می‌باشد، محاسبه قدرت جریان عرضی برای عرض‌های مختلف سیلابدشت می‌تواند به عنوان معیاری برای ارزیابی چگونگی تغییرات جریان عرضی نسبت به هندسه کانال مرکب منشوری مورد توجه قرار گیرد. بدین منظور میدان جریان حاصل از شبیه‌سازی عددی در کانال مرکب منشوری برای عرض ثابت کانال اصلی به میزان ۰/۴ متر و عرض‌های مختلف سیلابدشت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر، در دبی ثابت ۴۰ لیتر بر ثانیه، برای محاسبه قدرت جریان عرضی در مقطعی ۰ به فاصله ۱۴ متر از شروع کانال مورد استفاده قرار گرفت. برای محاسبه قدرت جریان عرضی از رابطه شماره (۴) استفاده گردید. این رابطه همان‌گونه که قبلاً بیان شد نسبت انرژی جنبشی جریان جانبی به انرژی جنبشی جریان اصلی را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه مناسب‌تر، مجموع مقادیر قدرت جریان عرضی در عمق، در فواصل مختلف از دیواره سیلابدشت و کانال اصلی محاسبه گردید. در این راستا این نتایج در فواصل یک سانتی‌متری در کانال اصلی تا فاصله ۱۰ سانتی‌متری از محل اتصال کانال اصلی به سیلابدشت و در فواصل یک سانتی‌متری تا فاصله ۵ سانتی‌متری از محل اتصال، در سیلابدشت محاسبه گردید. تغییرات مجموع مقادیر قدرت جریان عرضی در عمق برای چهار عرض مختلف سیلابدشت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری نسبت به فاصله از محل اتصال کانال اصلی و سیلابدشت در شکل (۹) ارائه گردیده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، محل اتصال کانال اصلی و سیلابدشت به عنوان مبدأ مختصات طولی انتخاب گردیده و این فاصله با توجه به عرض کانال اصلی بدون بعد گردیده است. با توجه به شکل (۹) به خوبی مشاهده می‌گردد که مطابق انتظار برای تمامی عرض‌های سیلابدشت، قدرت جریان عرضی از مقدار ناچیزی در وسط مقطع عرضی ناحیه اصلی کانال با یک روند افزایشی به مقدار حداکثر خود در نزدیکی محل اتصال کانال اصلی و ناحیه سیلابدشت رسیده و مجدداً با یک روند کاهشی با نزدیک شدن به جداره کانال در ناحیه سیلابدشت کاهش می‌یابد.

محل اتصال کانال اصلی و سیلابدشت به عنوان مبدأ مختصات طولی انتخاب گردیده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد برای تمامی عرض‌های مختلف سیلابدشت، مقدار قدرت چرخشی گردابه، در ناحیه سیلابدشت منفی بوده و با نزدیک شدن به محل اتصال کانال اصلی و سیلابدشت مقدار مطلق آن افزایش می‌یابد. در حالی که تغییرات این پارامتر در کانال اصلی در مجاورت ناحیه اتصال ابتدا دارای مقدار منفی بوده و با دور شدن از این ناحیه ابتدا مقدارش مثبت شده و سپس به سمت صفر میل می‌کند. با توجه به رابطه (۷) و شکل (۴-الف) تغییرات علامت قدرت چرخشی گردابه بیانگر تغییرات جهت چرخش گردابه می‌باشد. بنابر این با توجه به این موضوع، شکل (۱۱) نشان می‌دهد که در یک مقطع عرضی در یک کانال مرکب سه جریان گردابی ایجاد می‌گردد که این موضوع به وضوح در شکل (۸) که توسط Shiono و همکاران [۲۷] ارائه گردیده است مشاهده می‌گردد.

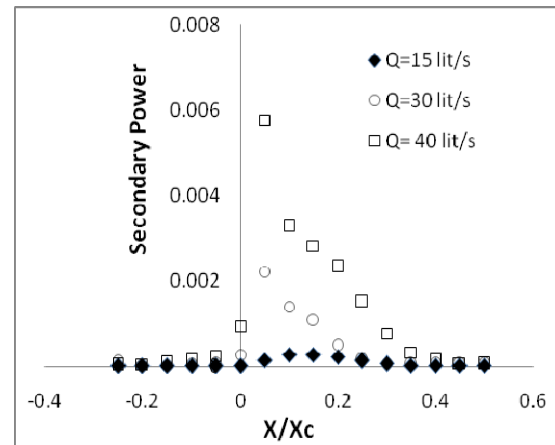
در شکل (۱۱) همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش عرض ناحیه سیلابدشت در کانال مرکب، قدرت چرخشی گردابه نیز به لحاظ مقدار در این ناحیه افزایش می‌یابد. که این نتیجه قبلاً نیز از طریق محاسبه قدرت جریان عرضی نسبت به افزایش عرض ناحیه سیلابدشت به دست آمده بود.

به منظور بررسی اثر دبی بر قدرت چرخشی گردابه، ابعاد هندسی کانال را ثابت نگه داشته (عرض کانال اصلی ۴۰ سانتی-متر) و (عرض ناحیه سیلابدشت ۱۰ سانتی-متر) و دبی را تغییر داده‌ایم. به همین منظور چهار دبی ۱۵، ۲۱، ۲۷ و ۴۰ لیتر بر ثانیه انتخاب و قدرت چرخشی گردابه برای آن‌ها محاسبه گردید. شکل (۱۲) تغییرات قدرت چرخشی گردابه بر حسب فاصله از محل اتصال کانال اصلی و ناحیه سیلابدشت را که با روند شرح داده شده قبلی محاسبه و ترسیم گردیده است نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- مقایسه قدرت چرخشی گردابه برای چهار عرض مختلف سیلابدشت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری و عرض یکسان کانال اصلی در دبی ثابت ۴۰ lit/s

افزایش دبی با افزایش سرعت در راستاهای مختلف همراه است، لذا قدرت جریان عرضی نیز با افزایش دبی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰- مقایسه قدرت جریان عرضی برای ابعاد هندسی ثابت کانال اصلی و سیلابدشت برای سه دبی متفاوت

۴-۴-۲- تغییرات قدرت چرخشی گردابه‌های ناشی از جریان عرضی برای عرض‌های مختلف سیلابدشت

وقوع جریان عرضی در کانال مرکب سبب ایجاد گردابه‌هایی می‌گردد که برای ارزیابی قدرت آن‌ها می‌توان از معیار قدرت چرخشی گردابه یا Vorticity استفاده نمود. بدین منظور میدان جریان حاصل از شبیه‌سازی عددی در کانال مرکب منشوری برای عرض ثابت کانال اصلی به میزان ۰/۴ متر و عرض‌های مختلف سیلابدشت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری و دبی ثابت ۴۰ لیتر بر ثانیه، برای محاسبه قدرت جریان عرضی در مقطعی به فاصله ۱۴ متر از شروع کانال مورد استفاده قرار گرفت. برای محاسبه قدرت چرخشی گردابه از رابطه (۷) استفاده گردید. این رابطه قدرت چرخشی گردابه حول محور اصلی جریان را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه مناسب‌تر، قدرت چرخشی گردابه متوسط‌گیری شده در عمق، در فواصل مختلف از دیواره سیلابدشت و کانال اصلی محاسبه گردید. در این راستا این نتایج در فواصل یک سانتی‌متری در کانال اصلی تا فاصله ۱۰ سانتی‌متری از محل اتصال کانال اصلی به سیلابدشت و در فواصل یک سانتی‌متری تا فاصله ۱۰ سانتی‌متری از محل اتصال، در ناحیه سیلابدشت محاسبه گردید. تغییرات قدرت چرخشی گردابه متوسط‌گیری شده در عمق برای چهار عرض مختلف سیلابدشت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری نسبت به فاصله از محل اتصال کانال اصلی و سیلابدشت در شکل (۱۱) ارائه گردیده است.

- با افزایش عرض ناحیه سیلابدشت، قدرت چرخشی گردابه در ناحیه اتصال کانال اصلی به سیلابدشت افزایش می‌یابد.

- برای دبی ثابت و ابعاد ثابت کانال اصلی، با افزایش عرض سیلابدشت، قدرت جریان عرضی افزایش می‌یابد.

- با توجه به تغییر مقادیر قدرت چرخشی گردابه (تغییر در جهت چرخش گردابه) در مقطع عرضی کانال می‌توان نتیجه گرفت که در مقطع عرضی کانال سه گردابه تشکیل می‌شود که این موضوع قبلاً توسط محققین دیگری از طریق برداشت آزمایشگاهی تأیید شده است.

- در کانال مرکب افزایش دبی با افزایش قدرت جریان عرضی و افزایش قدرت چرخشی جریان همراه خواهد بود.

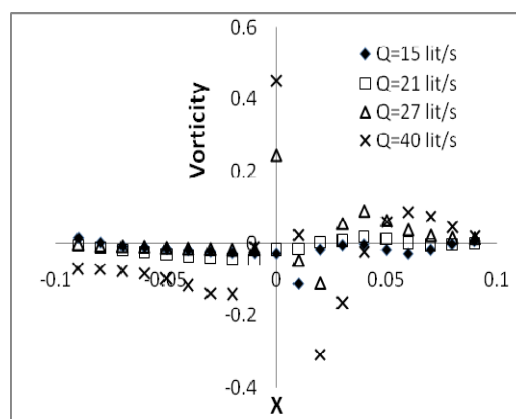
۶- تشکر و قدردانی

از آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه بیرمنگام انگلستان که قسمت آزمایشگاهی این تحقیق در آنجا انجام پذیرفته است سپاسگزاری می‌شود.

۷- مراجع

- [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] Knight, D. W., Demetriou, J. D., "Floodplain and Main Channel Flow Interaction", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 1983, 109 (8), 1073-1092.
- [3] Stephenson, D., Kolovopoulos, P., "Effects of Momentum Transfer in Compound Channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 1990, 116 (12), 1512-1522.
- [4] Shiono, K., Knight, D. W., "Turbulent Open-Channel Flows with Variable Depth across the Channel", *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 222, 617-646.
- [5] Prinos, P., Townsend, R., Tavoularis, S., "Structure of Turbulence in Compound Channel Flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, 1985, 111 (9), 1246-1261.
- [6] Shimizu, Y., Tsujimoto, T., "Comparison of Flood-flow Structure between Compound Channel and Channel with Vegetated Zone", *IAHR Congress*, Tokyo, Japan, 1993, pp 97-104.
- [7] Lambert, M. F., Sellin, R. H. J., "Discharge Prediction in Straight Compound Channels Using the Mixing Length Concept", *Journal*

همان‌گونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد، در صورتی که ابعاد هندسی کانال مرکب ثابت باقی‌ماند، از آنجا که افزایش دبی با افزایش سرعت در راستاهای مختلف همراه است، لذا قدرت چرخشی گردابه نیز با افزایش دبی افزایش می‌یابد. در این حالت نیز تفکیک سه گردابه در مقطع عرضی برای کلیه دبی‌ها به وضوح مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۲- مقایسه قدرت چرخشی گردابه برای ابعاد هندسی ثابت کانال اصلی و ناحیه سیلابدشت برای چهار دبی متفاوت

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا میدان جریان در کانال مرکب منشوری با استفاده از مدل‌های مختلف آشفتگی شبیه‌سازی گردید. برای این منظور نرم‌افزار محاسباتی ANSYS-CFX مورد استفاده قرار گرفته و نتایج حاصله با اطلاعات آزمایشگاهی مقایسه شد. در ادامه با انتخاب معیارهایی برای الگوی جریان، این معیارها برای کانال مرکب با عرض‌های مختلف سیلابدشت و دبی ثابت و نیز کانال مرکب با ابعاد هندسی ثابت و دبی‌های مختلف محاسبه و مقایسه گردید. اهم نتایج حاصله به شرح ذیل است:

- نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که انطباق نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی به طور کلی قابل قبول است.
- نتایج سرعت طولی به دست آمده از روش VOF به ویژه در قسمت اصلی کانال مرکب به مراتب به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر از نتایج حاصل از روش Rigid Lid می‌باشد.
- اغلب مدل‌های آشفتگی، میدان سرعت طولی در کانال مرکب را به طور مطلوبی پیش‌بینی نمی‌نمایند.
- مدل RSM در شبیه‌سازی جریان عرضی در کانال‌های مرکب توانا تر از سایر مدل‌های آشفتگی عمل آشفتگی می‌کند.

- Design of Channels with Different Roughness of Walls", Transactions of All Union Scientific Research, 1933, 238-241.
- [21] Abril, B., "Benchmark Comparisons of the Analytical and Finite Element Solutions of the SKM", Technical Report EPSRC Research Grant, GR/R54880/01, University of Birmingham, UK, 2003.
- [22] Shiono, K., Knight, D. W., "Two Dimensional Analytical Solution Compound Channel", The 3rd International Symposium On Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Universal Academy Press, 1989, pp 591-599.
- [23] Weber, J. F., "1D-2D Integrated Modeling of Floodplain Flows", MSc Thesis, University of Cordoba, Argentina, 2003.
- [24] MacWilliams, M. L., "Three-dimensional Hydrodynamic Simulation of River Channels and Floodplains", PhD Thesis, Stanford University, 2004.
- [25] Toebe, G. H., Sooky, A. A., "Hydraulics of Meandering Rivers with Floodplains", Journal of Waterway and Harbor Division, ASCE, 1967, 93 (2), 213-236.
- [26] Shukry, A., "Flow Around Bends in an Open Flume", Transactions, ASCE, 1950, 115, 54-66.
- [27] Shino, K., Scott, C. F., Kearney, D., "Predictions of Solute Transport in a Compound Channel Using Turbulence Models", Journal of Hydraulic Research, 2003, 41 (3), 247-258.
- [۲۸] فضلی، م.، اسفندیاری، س.، رضایی، ب.، "مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی جریان در کانال‌های مرکب منشوری با مدل‌های مختلف آشفتگی"، مجموعه مقالات نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، ۱۳۹۱، ص ۱۱۵-۱۲۳.
- [۲۹] صفارزاده، ع. ر.، "شبیه‌سازی عددی جریان در کانال‌های مرکب منشوری با سیلاب‌دشت‌های به عرض متفاوت"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، ۱۳۹۲.
- [8] Sofialidis, D., Prinos, P., "Turbulent Flow in Open Channels with Smooth and Rough Flood Plains", Journal of Hydraulic Research, 1999, 37 (5), 615-640.
- [9] Shiono, K., Knight, D. W., "Turbulent Open Channel Flows with Variable Depth Across the channel", Journal of Fluid Mechanics, 1991, 222, 617-646.
- [10] Myers, R. C., Lyness, J. F., "Discharge Ratios in Smooth and Rough Compound Channels", Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123 (3), 182-188.
- [11] Tominaga, A., Nezu, I., "Turbulent Structure in Compound Open Channel Flows", Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 117 (1), 21-41.
- [12] Naot, D., Nezu, I., "Hydrodynamic Behavior of Compound Rectangular Open Channels", Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 119, 390-408.
- [13] Ghosh, S., Jena, S. B., "Boundary Shear Stress Distribution in Open Channel Compound", Proceedings of the Institution of Civil Engineering, 1971, 49, 417-430.
- [14] Myers, W. R. C., Elsayy, E. M., "Boundary Shear in Channels with Floodplain", Journal of Hydraulic Division, 1975, 101 (7), 993-1025.
- [15] Rhodes, D. G., Knight, D. W., "Distribution of Shear Force on the Boundary of a Smooth Rectangular Duct", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1994, 120 (7), 787-807.
- [16] Patra, K. C., Kar, S. K., "Flow Interaction of Meandering River with Floodplains", Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126 (8), 593-603.
- [17] Lai, C. J., Knight, D. W., "Distributions of Streamwise Velocity and Boundary Shear Stress in Compound Ducts", The 3rd International Symposium On Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Universal Academy Press, 1989, pp 442-480.
- [18] Myers, W. R. C., Brennan, E. K., "Flow Resistance in Compound Channels", Journal of Hydraulic Research, IAHR, 1990, 28 (2), 141-155.
- [19] Lee, P. J., Lambert, M. F., Simpson, A. R., "Critical Depth Prediction in Straight Compound Channels", Water & Maritime Engineering, 2002, 154, 317-332.
- [20] Lotter, G. K., "Considerations on Hydraulic

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of Changing the Width of Flood Plains and Discharges on Secondary Flow in Prismatic Compound Channel

Majid Fazli *, Mohammad Ali Kaviani

Faculty of Engineering, University of BuAli sina, Hamedan 65175-4161, Iran

Received: 18 April 2014; **Accepted:** 17 November 2014

Keywords:

Compound channel, Vorticity, Secondary Flow, Flow filed, Turbulence models

1. Introduction

Velocity in a main channel is much higher than the floodplain in compound channels. This leads to the transfer of momentum between the main channel water and that of the floodplain. The relative “pull” and “drag” of the flow between faster and slower moving sections of a compound channel, complicates the momentum transfer between them. This momentum transfer also causes a secondary flow in compound channels. Considerable research on physical models for the behavior of the compound channels with different widths of the main channel and floodplain have been done by Shiono and Knight [1], and Myers and Lines [2]. These researches help to understand the complex pattern of flow and boundary shear stress that has a significant role in momentum transfer between main channel and floodplain. Extensive studies have been for combination parameters of flow field in curved channels with compound channels as well as done in a sinusoidal compound channels. Toebs and sooky Studies in this direction can be pointed out [3]. In addition to compound channel, another locations that the secondary flow has an important effect on behavior of flow filed are in the channels and rivers bends. Some of flow characteristics such as secondary flow power and vortices power can assist to better understanding of flow filed in bends. Despite of expanded using of these characteristics in bends, they haven't used in compound channel too much. In this research, the flow filed was simulated using different turbulence models and verified by experimental data in prismatic compound channel. Then the secondary flow power and vortices power of secondary flow in compound channel were computed.

2. Methodology

2.1. Experimental study

The data of an experimental study on a compound channel was used for verification of numerical simulation results. Plan and cross section of the channel is shown in Fig. 1. The longitudinal velocity of the channel flow was measured using a Novar Nixon velocimeter. In this compound channel, the main channel has constant width, while the width varies for floodplain.

* Corresponding Author

E-mail addresses: mfazli@basu.ac.ir (Majid Fazli), mohamadali.kaviani@gmail.com (Mohamad Ali Kaviani)

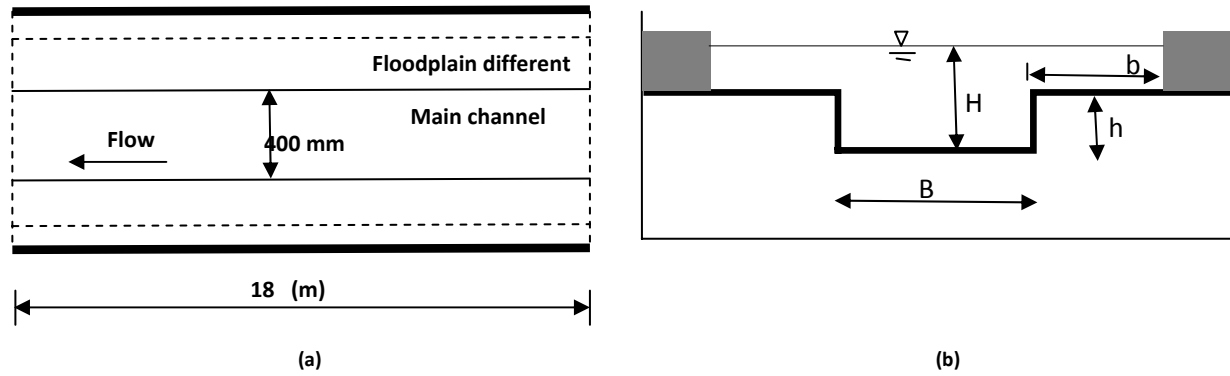


Fig. 1. (a) Plan, (b) Cross section of the research channel

2.2. Numerical simulation

The ANSYS CFX package was used for the numerical modeling and analysis. In this study, for better compliance with the experimental results, all of turbulence models in ANSYS CFX package were used. Simulations were performed for a wide variety of width of floodplains and different discharges. The power of secondary flow was calculated according to Shukry [4], and rotating vortex strength criteria, respectively using the Eqs. 1 and 2.

$$s_{xy} = \frac{\left(\frac{V_{xy}^2}{2g}\right)}{\left(\frac{V^2}{2g}\right)} \quad (1)$$

$$\omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2)$$

3. Results and discussion

3.1. Comparing the VOF and Rigid Lid methods for simulating free surface flows

In this study, simulation of free surface water flow in compound channels using both the VOF and Rigid Lid procedure was carried out. Results showed that the VOF method, especially in the main channel is closer to the experimental results than Rigid Lid method.

3.2. Comparison of turbulence models

To investigate the effect of turbulence models on flow in compound channels, simulations were carried out by using all of turbulence models in ANSYS CFX package. Results show that the RSM model, in the main channel especially in the center region is closer to the experimental results.

3.3. Comparing results of the numerical analysis and experimental transverse velocity

To evaluate the advantages of numerical simulations by ANSYS CFX package, the results were compared with experimental results of Shiono and Knight [1]. Qualitative comparison shows that the three vortices observed by Shiono and Knight in cross-section in compound channel are also well seen in the results of numerical simulations.

3.4. Advantages of different flood plains width and different discharges

To investigate the effect of floodplains width on the flow pattern in compound channel, the simulations was made with constant main channel width 0.4 meter and flood plains width 0.1, 0.2, 0.3 and 0.4 meter. Then strength of secondary flow and Rotating vortex strength were calculated by using the Eqs. 1 and 2. As well as to investigate the effect of discharge on flow pattern in compound channel, numerical simulations were carried out for fixed channel geometry and different discharges.

4. Conclusions

The flow field in prismatic compound channels was simulated by using different turbulence models. ANSYS-CFX was used and results were compared with experimental data. Numerical simulation results showed that there is a good agreement with experimental data. In this regard, result of VOF method with RSM turbulence model had a better condition. Results also showed that by increasing the width of floodplain, the strength of secondary flow and vortex strength (vorticity) increases in cross section especially at the junction region of floodplain and main channel for constant discharge. Also, if the compound channels geometry does not change, the strength of secondary flow and rotating vortex strength increase with increasing discharge.

5. References

- [1] Shiono, K., Knight, D. W., "Two dimensional analytical solution compound channel", The 3th International Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Universal Academy Press, 1989, pp 591-599.
- [2] Myers, R. C., Lyness, J. F., "Discharge Ratios in Smooth and Rough Compound Channels", Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123 (3), 182-188.
- [3] Toebes, G. H., Sooky, A. A., "Hydraulics of Meandering Rivers with Flood Plains", Journal of Waterway and Harbor Division, ASCE, 1967, 93 (2), 213-236.
- [4] Shukry, A., "Flow around Bends in an Open Flume", Transactions, ASCE, 1950, 115.