

اثر هندسه دیوار جدا کننده کانال فرعی بر الگوی جریان یک کانال باز بزرگ مقیاس با تقاطع ۹۰°

سعید محمدیون^۱، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^{۲*}، حمید پرهیزکار^۳، حامد وهابی^۴

۱- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست و پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۴- دانشجوی مقطع دکتری، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه ایالتی کلرادو

Salehi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۲/۱۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۱۱/۲۰]

چکیده- تقاطع کانال‌های باز استفاده وسیعی در کارهای آبی دارد. شکل‌گیری ناحیه کم فشار با جریان بازچرخشی (ناحیه با پتانسیل رسوب‌گذاری بالا) و نیز ناحیه پر سرعت (ناحیه با پتانسیل آبشستگی بالا) از مهم‌ترین مشخصه‌های جریان در این کانال‌ها به حساب می‌آیند. تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه شناسایی الگوی جریان در این کانال‌ها و رفع مشکلات هیدرولیکی یاد شده صورت گرفته است. در این پژوهش نیز استفاده از دیوار جداکننده به عنوان راه‌کاری برای کاهش پتانسیل آبشستگی و رسوب‌گذاری بررسی کامل شده است. ابتدا مدل عددی یک نمونه آزمایشگاهی موجود تولید شده و نتایج آن با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن آثار هوا درستی آزمایی شده‌اند. در ادامه، اثر راهکار یاد شده بر الگوی جریان بررسی شد و طرح‌هایی برای بهبود هندسه آن ارائه و ارزیابی شده‌است. در میان طرح‌های بررسی شده دیوار جداکننده با لبه نیم‌دایره‌ای بهترین عمل‌کرد را به لحاظ کاهش بیشینه سرعت پس از تقاطع نشان داده است. نتایج این پژوهش کاهش قابل ملاحظه‌ای را در پتانسیل آبشستگی و رسوب‌گذاری جریان نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: تقاطع کانال‌های باز، دیوار جداکننده، مدل عددی، رسوب‌گذاری، آبشستگی

۱- مقدمه

منجر به افزایش سرعت عبوری در مجاورت کف و جداره بالایی کانال می‌شود. این افزایش سرعت در درازمدت، آبشستگی این ناحیه را در برخواهد داشت. کاهش رسوب‌گذاری در ناحیه بازچرخشی و آبشستگی در فضای بالای صفحه برشی (صفحه فرضی جدا کننده دو جریان اصلی و جانبی)، از جمله مهم‌ترین دغدغه‌های طراحی این سازه‌ها است.

پژوهش‌های آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی متعددی در زمینه شناسایی الگوی جریان در تقاطع‌ها با هدف کاهش اثر رسوب‌گذاری و آبشستگی صورت گرفته است. بست و رید به بررسی عوامل موثر بر تغییر ابعاد ناحیه جدایش پرداخته و

تقاطع کانال‌های باز از پدیده‌های رایج در طبیعت و سیستم‌های آبیاری و زهکشی است. این سازه‌ها در پخش و انتقال آلاینده‌ها نیز حائز اهمیت است. تبادل مومنتوم ورودی از کانال جانبی با جریان اصلی پس از برخورد با آن، باعث انحراف جریان کانال فرعی به سمت پایین دست تقاطع می‌شود. شکل‌گیری ناحیه بازچرخشی با فشار پایین در مجاورت دیواره سمت کانال جانبی، از جمله بارزترین مشخصات جریان در این تقاطع‌ها است. جریان بازچرخشی در این ناحیه با فشار پایین، از یک سو فضای کافی برای رسوب‌گذاری را در اختیار جریان قرار داده و از طرف دیگر ضمن کاهش سطح مقطع عبوری جریان،

کاستی‌های مدل ریاضی استفاده شده این پژوهش را برشمردند [۱]. راما مورتی و کاربالادا از طریق حل قانون بقا مومنتوم، به بررسی ارتباط بین افزایش عمق آب کانال و نسبت دبی کانال جانبی به دبی کل پرداختند [۲]. وبر و همکارانش در مجموعه آزمایش‌ها، اطلاعات سه بعدی بسیار کاملی در زمینه سرعت و نیز مقادیر پارامترهای آشفتگی استخراج کرده و نگاشتی برای سطح آزاد اطراف تقاطع تیز قائم ارائه نمودند [۳]. هوانگ و همکارانش از روش عددی به منظور بررسی پارامتری جریان در تقاطع‌ها و ارزیابی اثر زاویه تقاطع استفاده کردند [۴]. شاملو و پیرزاده از روش حل عددی به منظور بررسی آثار نسبت دبی بر ویژگی‌های جریان در ناحیه اختلاط کانال باز با تقاطع ۹۰ درجه، استفاده نمودند [۵]. یانگ و همکارانش به بررسی عددی ساختار جریان در تقاطع با زاویه ۳۰ درجه در پنج دبی نسبی متفاوت پرداختند. در این پژوهش از مدل‌سازی عددی دو فاز با رویکرد اولیرین استفاده شده و سطح آزاد به وسیله‌ی روش VOF^1 مدل شده است [۶]. ژنگ و لی به مقایسه مدل‌های آشفتگی LES^2 ، $RANS^3$ و مدل ترکیبی آن‌ها پرداخته و مزایای مدل ترکیبی را در مدل‌سازی جریان‌های چرخشی در جریان‌های پیچیده مانند کانال‌های باز برشمردند [۷].

برای اصلاح الگوی جریان در ناحیه تقاطع و پس از آن، رویکردهای متفاوتی با هدف کاهش سایز ناحیه جدایش و نیز پتانسیل آب‌شستگی در پژوهش‌های گوناگون مورد توجه قرار گرفته است. برقی و همکارانش به بررسی آزمایشگاهی پدیده فرسایش و الگوی رسوب در تقاطع کانال‌های قائم باز پرداخته و اثر پارامترهایی همچون نسبت دبی و نیز نسبت عرض کانال فرعی به اصلی را مورد بررسی قرار دادند [۸]. امرایی و همکارانش از روش حل عددی برای ارزیابی آثار زوایای مختلف اتصال کانال فرعی به اصلی بر الگوی جریان بعد از ناحیه تقاطع و همچنین ابعاد ناحیه جدایش استفاده کردند [۹]. محمدی و شفاعی بجستان ضمن ساخت یک مدل فیزیکی، تاثیر شعاع گردشگری لبه پایین دست محل اتصال بر عمق

آب‌شستگی را بررسی کردند [۱۰]. هم‌چنین کرمی مقدم و همکارانش با استفاده از مدل $SSIIM2$ به ارزیابی اثر شعاع گردشگری ناحیه تقاطع بر ابعاد ناحیه جدایش پرداخته و نتایج را به کمک روش فیزیکی مورد راستی آزمایی قرار دادند [۱۱]. محمدیون و همکارانش با به کارگیری اصلاحات مختلف هندسی، پتانسیل رسوب گذاری و آب‌شستگی را در تقاطع کانال‌های باز مستقیم کاهش دادند [۱۲]. هم‌چنین آن‌ها با به کارگیری صفحات مستغرق، کاهش چشم‌گیری در رسوب گذاری این نوع از تقاطع مشاهده نمودند، و پارامترهای بهینه مربوط به این صفحات را معرفی کردند [۱۳].

کاربرد یک دیواره جداکننده که به موازات جداره‌های کانال فرعی و در قسمت میانی آن کشیده می‌شود، در بخش‌های مختلف مانند: نیروگاه‌ها و سدها، به منظور تامین دو مجرای مجزا، امری رایج است. وجود دو مجرای مجزا، امکان بهره‌گیری از بخشی از ظرفیت کانال در شرایط تعمیر و نگهداری را میسر می‌نماید. باوجود استفاده از این دیوارها در مجاری صنعتی، تاکنون تاثیر آن‌ها بر الگوی جریان تقاطع در کانال اصلی و نیز پتانسیل آب‌شستگی و رسوب‌گذاری در ناحیه پس از تقاطع بررسی شده قرار نگرفته است. به همین دلیل در این مقاله کارکرد دیوار جداکننده به عنوان راهکاری عملی در کاهش عرض ناحیه جدایش و کاهش بیشینه سرعت جریان پس از تقاطع در کانال اصلی (با ابعاد واقعی) بررسی کامل شده و در پایان آثار تغییر هندسی دیوار بر بهبود روند جریان ارزیابی می‌شود.

در این پژوهش به منظور ارزیابی دقیق اثر دیوار جداکننده بر رژیم جریان، از روش حل عددی سه بعدی استفاده شده است. بدین منظور ابتدا مدل عددی تقاطع قائم ساده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی وبر و همکارانش [۳] راستی آزمایی شده و در ادامه، آثار دیوار جدا کننده و اصلاحات هندسی آن در مدلی با ابعاد واقعی، به طور کامل بررسی شده است. در پایان طرح بهینه پیشنهاد شده و میزان تاثیر آن بر کاهش ابعاد ناحیه جدایش و اصلاح رژیم جریان در ناحیه بعد از تقاطع معرفی شده است.

1 Volume of Fluid

2 Large Eddy Simulation

3 Reynolds Average Navier Stokes

۲- مدل عددی

معادلات حاکم بر جریان دائمی سیال تراکم‌ناپذیر در کانال‌های باز عبارتند از معادلات متوسط‌گیری زمانی شده ناویر-استوکس که در مختصات کارتزین به شرح زیر است [۱۴]:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji} - \rho \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

که در آن‌ها x_i $i, j=1, 2, 3$ بیانگر محورهای مختصات، U_i سرعت متوسط در سه جهت x (هم جهت با جریان)، y (جانبی) و z (قائم)، P فشار، ρ دانسیته سیال و $\overline{u_i u_j}$ مولفه‌های تانسور تنش رینولدز است. تعیین تنش‌های رینولدز مستلزم تعریف یک مدل آشفتگی برای حل معادلات فوق است. عمل کرد مدل‌های مختلف آشفتگی دو تا هفت معادله‌ای برای مدل‌سازی جریان در تقاطع کانال‌های باز مستقیم در مرجع [۱۵] به تفصیل بررسی شده، و مدل RSM^1 به عنوان بهترین مدل آشفتگی برای حل عددی الگوی جریان در این نوع تقاطع معرفی شده است. در این پژوهش نیز به منظور لحاظ کردن آثار آشفتگی از مدل هفت معادله‌ای RSM استفاده شده است که در آن، فرض ساده کننده لزجت گردابه‌ای همگن^۲ حذف شده و از حل معادلات انتقال برای تنش‌های رینولدز همراه با یک معادله برای نرخ استهلاک آشفتگی^۳ به منظور بسته شدن دستگاه معادلات استفاده شده است. از آنجا که مدل RSM در مقایسه با بیشتر مدل‌های آشفتگی، قابلیت بهتری در لحاظ کردن آثار خطوط جریان با انحنای شدید، چرخش، دوران و تغییرات شدید نرخ کرنش، در گستره وسیع‌تری از جریان‌ها را داراست، پس این مدل پتانسیل بیشتری در پیش‌بینی آثار آشفتگی در جریان‌های پیچیده مانند استخراج جریان‌های ثانویه و نواحی جدایش دارد [۱۴].

شبیه‌سازی جریان به وسیله نرم‌افزار تجاری $ANSYS FLUENT 14^{\circ}$ که با روش حجم محدود قادر به حل معادلات جریان، آشفتگی، انتقال حرارت و واکنش‌های شیمیایی است، صورت پذیرفت [۱۴].

حل عددی بر مبنای ابعاد ارائه شده در مدل آزمایشگاهی وبر و همکارانش [۳] اجرا شد که در آن، یک تقاطع ۹۰ درجه با مقاطع مستطیلی مشابه به طول و عرض به ترتیب ۰/۹۱۴ و ۰/۵۱ متر مورد آزمایش قرار گرفته است [۳]. ابعاد و موقعیت دستگاه مختصات در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند. در این پژوهش، مختصات بدون بعد که به وسیله عرض مقطع $(W=0.914 \text{ m})$ بی‌بعد شده، با x^* ، y^* و z^* نشان داده شده است. نظر به مشخص نبودن سطح آزاد جریان، توزیع سرعت ورودی نمی‌تواند به صورت کاملاً توسعه یافته در نظر گرفته شود. به همین دلیل در مدل‌سازی عددی، بنا به توصیه هوانگ و همکارانش [۴]، طول کانال اصلی قبل از تقاطع به ۱۰/۹۷۳ و طول کانال جانبی به ۹/۱۴۴ $(10 \times W)$ متر افزایش یافته‌اند.

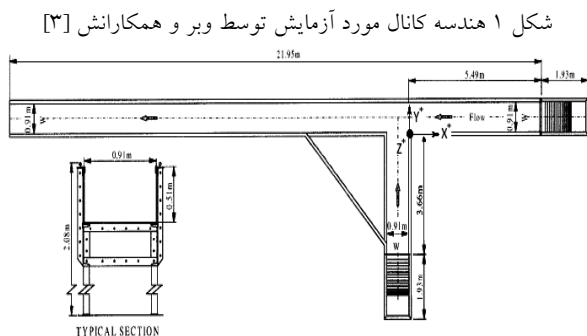


Fig. 1. Experimental channel of Weber et al.'s study [3]

در معرفی مرزهای ورودی جریان از شرط مرزی Velocity Inlet و مرز خروجی از شرط Pressure Outlet استفاده شد و کلیه پارامترهای مرتبط با مرزهای یاد شده از نتایج مدل آزمایشگاهی وبر و همکارانش [۳] استخراج شد. ضمن این‌که آنالیز پایا با هدف شناسایی الگوی جریان در شرایط ثابت عملیاتی اجرا شد. با توجه به مطالعات عدم وابستگی به ابعاد شبکه و نیز ظرفیت محاسباتی موجود، تعداد $60 \times 40 \times 30$ سلول (به ترتیب در جهات x, y, z) در کانال اصلی و قبل از تقاطع، تعداد $20 \times 40 \times 30$ (به ترتیب در جهات x, y, z) در کانال اصلی بعد از تقاطع و نیز $55 \times 40 \times 30$ سلول (به ترتیب در جهات x, y, z) در کانال جانبی مورد استفاده قرار گرفت. ضمن اینکه در نواحی مجاور تقاطع از شبکه ریزتری استفاده شد.

1 Reynolds Stress Modeling

2 Isotropic eddy-viscosity hypothesis

3 Dissipation rate

جریان در کانال‌های باز ذاتاً مشتمل بر دو فاز آب و هوا است.

هر چند در صورت عدم شکل‌گیری اختلاف ارتفاع قابل ملاحظه در سطح آزاد جریان، می‌توان از مدل‌سازی تک فاز که هزینه محاسباتی بسیار کمتری نسبت به مدل‌سازی دو فازی دارد، به عنوان جایگزین استفاده کرده و سرعت نرمال در سطح آزاد جریان را صفر فرض نمود. لشزاینر و ردی بیان می‌کنند که اگر بیشینه برابندی سطح آب از ۱۰٪ عمق کانال تجاوز نکند، می‌توان سطح آب را به عنوان یک پوشش صلب در نظر گرفته و از شرط مرزی تقارن برای آن استفاده کرد [۱۶]. در این پژوهش به منظور حصول اطمینان از درستی عمل کرد مدل تک فاز، مسئله به صورت دو فاز نیز مدل شده و نتایج با حل تک فاز مقایسه شد. در حل دو فاز که با رویکرد اویلری مورد بررسی قرار گرفت، ارتفاع کل کانال لحاظ شد و فصل مشترک آب و هوا به کمک الگوریتم VOF مدل سازی شد. سطح آزاد سیال در مدل تک فاز به عنوان یک مرز بدون سرعت عمودی مدل شد که هیچ محدودیتی در سرعت مماس بر مرز ایجاد نمی‌کند (شرط مرزی تقارن) پس عمق در تمام کانال ثابت و برابر با عمق پایاب آزمایش‌های وبر و همکارانش [۳] فرض شد.

۳- راستی آزمایشی

نتایج پژوهش آزمایشگاهی وبر و همکارانش [۳] به منظور راستی آزمایشی استفاده شده است. مولفه‌های مختلف سرعت جریان در مقاطع مختلف عرضی و در اعماق مختلف اندازه‌گیری و به کمک سرعت میانگین جریان پایین دست $(V_f = 0.628 \text{ m/s})$ بی‌بعد شده و با u^* ، v^* و w^* نشان داده شده‌اند. از مجموعه اطلاعات این آزمایش، نتایج مربوط به نسبت دبی $0.25 (q^*)$ که ناحیه جدایش مشخص‌تری ایجاد می‌کند، به منظور راستی آزمایشی استفاده شده است [۴].

مدل عددی دو فاز با رویکرد اویلری بررسی شده، و ارتفاع کل کانال (۰/۵۱ متر) در آن لحاظ شده است. ضمن اینکه عمق آب ۰/۲۹ متر در نظر گرفته شده. منحنی‌های هم‌تراز u^* که از مدل عددی استخراج شده و هم‌چنین مقادیر این پارامتر بر مبنای نتایج آزمایشگاهی وبر و همکارانش، در موقعیت‌های

شکل ۲ منحنی‌های هم‌تراز سرعت u^* در ارتفاع $z^* = 0.278$ و مقطع

عرضی $(x^* = -2)$ در مدل عددی دو فاز و نتایج آزمایشگاهی

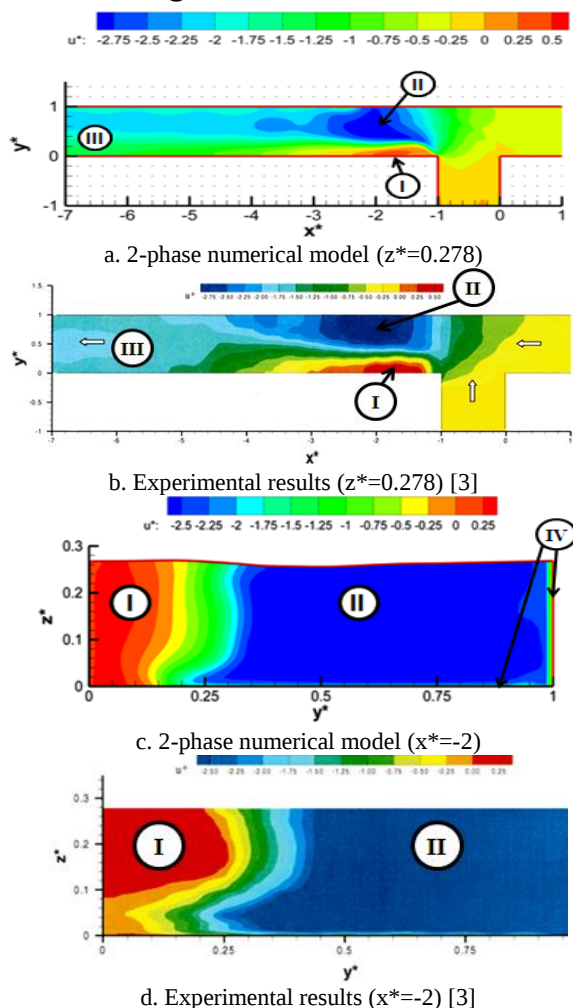
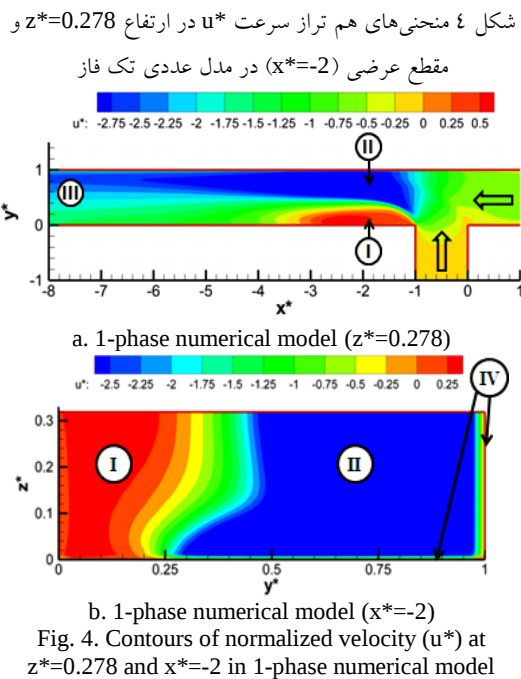


Fig. 2. Contours of normalized velocity (u^*) at $z^* = 0.278$ and $x^* = -2$ in 2-phase numerical model and experiment

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، ناحیه بازچرخشی پس از تقاطع (ناحیه I) که در مدل عددی پیش‌بینی شده است، در نتایج آزمایشگاهی وبر و همکارانش نیز مشاهده می‌شود. شکل‌گیری سرعت‌های کوچک مثبت و منفی از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های این ناحیه است.

وجود ناحیه بازچرخشی، سطح مقطع عبوری جریان را کاهش داده و سرعت در ناحیه II را افزایش می‌دهد. پس از عبور از نواحی یاد شده، جریان به مرور حالت کاملاً توسعه یافته به خود می‌گیرد (عبور از ناحیه III). برخلاف شباهت‌های اشاره شده، گرادیان سرعت شدید در مجاورت دیوارها (ناحیه IV در

۴)، تقسیم نواحی I و II اندکی با حالت دو فاز و نیز نتایج آزمایشگاهی (شکل ۲) متفاوت است.



مقادیر بیشینه سرعت u^* در راستای کانال اصلی و پس از تقاطع که از حل تک فاز و نتایج آزمایشگاهی استخراج شده‌اند، در شکل (۵) نشان داده شده است که اختلاف قابل چشم‌پوشی (کم‌تر از ۷٪) را نشان می‌دهد.

شکل ۵ تغییرات قدر مطلق سرعت بیشینه u^* در طول کانال اصلی و پس از تقاطع

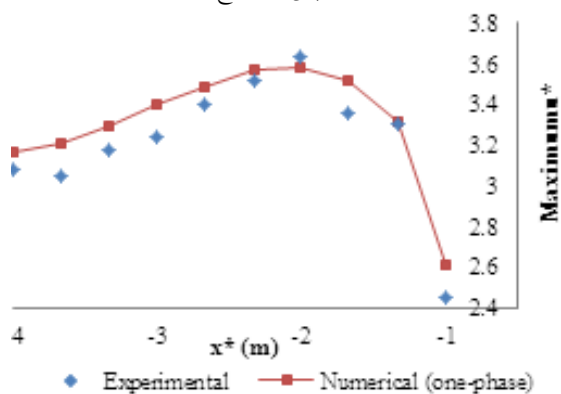


Fig. 5. Variation of the absolute maximum U^* along the channel after junction in 1-phase and experimental models

به منظور بررسی دقیق‌تر مدل تک فاز، مقادیر مولفه سرعت u^* در موقعیت $x^*=-2$ و $y^*=0.25, 0.375, 0.5, 0.625$ در عمق

شکل ۲ ج)، در مدل آزمایشگاهی قابل رویت نیست (شکل ۲ د)، که با توجه به فواصل نسبتاً زیاد سرعت‌سنج‌ها در مدل آزمایشگاهی قابل پیش‌بینی بود.

مقایسه دقیق‌تر مقادیر عددی و آزمایشگاهی بیشینه سرعت u^* در طول کانال اصلی پس از تقاطع شکل (۳)، تطابق قابل ملاحظه نتایج مدل دو فاز با مقادیر آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۳) دیده می‌شود، بیشینه سرعت جریان پس از تقاطع تا موقعیت $x^*=-2$ افزایش یافته و پس از آن به مرور کاهش می‌یابد.

شکل ۳ تغییرات قدر مطلق سرعت بیشینه u^* در طول کانال اصلی و پس از تقاطع در مدل عددی دو فاز و آزمایشگاهی

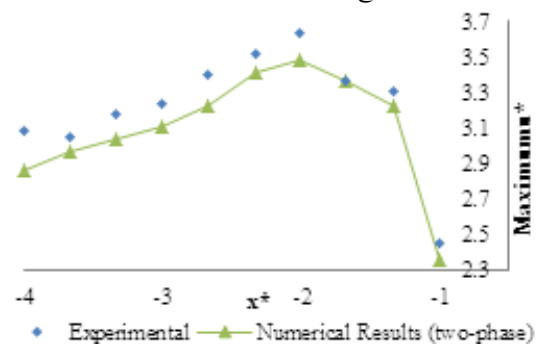


Fig. 3. Variation of the absolute maximum U^* along the channel after junction in 2-phase and experimental models

همان‌گونه که پیش‌تر مطرح شد، یافته‌های لشزاینر و ردی [۱۶] نشان می‌دهد که اگر بیشینه برآمدی سطح آب از ۱۰٪ عمق کانال تجاوز نکند، می‌توان سطح آب را به عنوان یک پوشش صلب در نظر گرفته و از شرط مرزی تقارن برای آن استفاده نمود. استفاده از مدل تک فاز به عنوان جایگزین مدل دو فازی، زمان محاسبات را تا حد قابل ملاحظه‌ای می‌کاهد به همین دلیل با توجه به اینکه بیش‌ترین برآمدی سیال (ارتفاع سیال نسبت به تراز میانگین آن) در این پژوهش، قبل از تقاطع شکل گرفته که نسبت به تراز میانگین، قابل چشم‌پوشی است (کم‌تر از ۶٪)، امکان جایگزینی گزینه تک فاز با مدل عددی دو فاز، در این پژوهش بررسی بیش‌تر شده است.

در مدل عددی تک فاز، عمق در تمام کانال ثابت و برابر با عمق پایاب آزمایش‌های وبر و همکارانش [۳] (برابر ۰/۲۹ متر معادل $z^*=0.32$) فرض شده است. در نتایج حل تک فاز (شکل

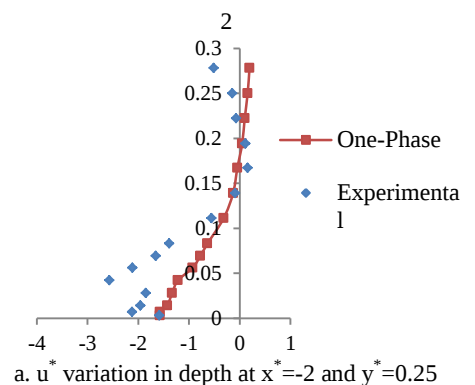
هماهنگی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و حل تک فاز وجود دارد. شکل ۶ الف مقادیر سرعت u^* در مقطع $y^*=0.25$ را نشان می‌دهد. قسمت بالایی این مقطع در ناحیه بازچرخشی قرار می‌گیرد؛ بنابراین مقادیر سرعت در بخش بالایی مقطع $y^*=0.25$ کوچک و حتی مثبت است. در شکل ۶ ب نیز به دلیل عرض بیش‌تر ناحیه جدایش در نزدیک سطح جریان نسبت به کف کانال، سرعت در این ناحیه کم‌تر از نزدیکی کف کانال است. با حرکت از دیوار پایینی کانال به سمت لبه بالایی آن و دور شدن از ناحیه بازچرخشی، به مرور از گردایان سرعت کاسته شده و پروفیل سرعت حالت یکنواخت‌تری به خود گرفته و به شکل پروفیل سرعت در نواحی دور از تقاطع نزدیک می‌شود (شکل ۶ ج و د).

برای بررسی جریان‌های ثانویه در مقطع عرضی کانال، در شکل ۷ میدان برداری v^*-w^* در $x^*=-2$ که دارای بیش‌ترین انقباض در جریان کانال اصلی بوده و از این رو دشوارترین مقطع برای مدل‌سازی عددی است که از نتایج آزمایشگاهی و عددی به نمایش درآمده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در نتایج آزمایشگاهی حضور دو گردابه عرضی، یکی در مجاورت دیوار سمت تقاطع و دیگری در نیمه دوم کانال گزارش شده است. گردابه اصلی از نوع گردابه‌های اجباری و ناشی از حضور ناحیه جدایش بوده و گردابه کوچک‌تر (در گوشه بالایی سمت تقاطع) از نوع گردابه‌های آشفتگی و حاصل اختلاف مقادیر تنش‌های قائم رینولدز است. با توجه به پژوهش هوانگ و همکارانش [۴] مدل دو معادله‌ای $k-\omega$ قادر به ثبت این گردابه نبوده است ولی در این پژوهش مدل آشفتگی RSM علاوه‌بر گردابه اصلی این گردابه را نیز ثبت نموده است، که دلیل آن حل معادلات دقیق انتقال برای هر یک از مولفه‌های تانسور تنش رینولدز است.

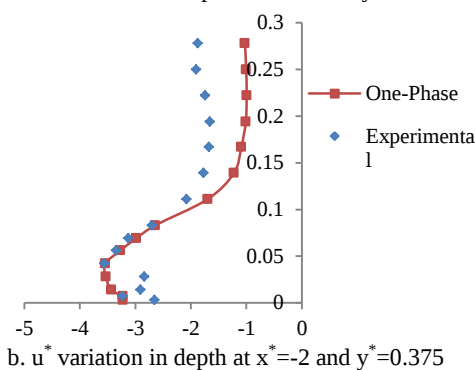
تفاوت‌های اندک در ثبت محل مرکز گردابه اصلی، ناشی از استفاده شبکه بسیار ریزتر در مدل‌سازی عددی نسبت به آزمایشگاهی بوده است. هم‌چنین مطابق آنچه در قبل نیز گفته شد، مقطع عرضی بررسی شده دشوارترین مقطع برای مدل‌سازی عددی است.

کانال، که از مدل عددی و نتایج آزمایشگاهی استخراج شده‌اند، در شکل (۶) نمایش داده شده‌است. در این تصاویر، محور افقی معرف مقادیر سرعت u^* و محور قائم معرف راستای عمق جریان است.

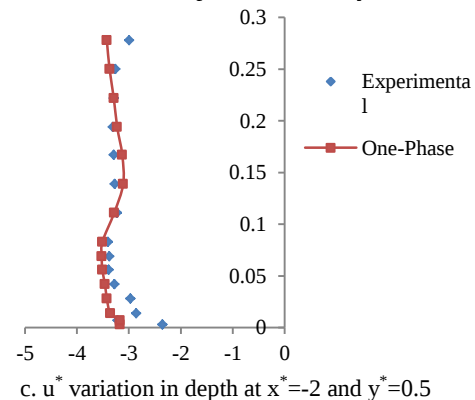
شکل (۶) تغییرات مولفه سرعت u^* در عمق کانال در موقعیت $x^*=-2$



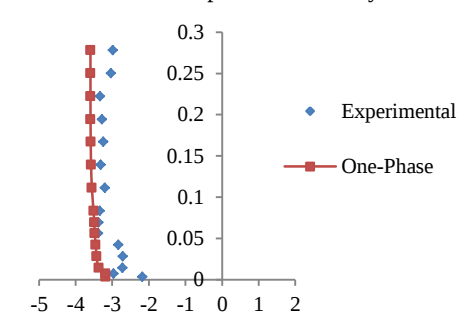
a. u^* variation in depth at $x^*=-2$ and $y^*=0.25$



b. u^* variation in depth at $x^*=-2$ and $y^*=0.375$



c. u^* variation in depth at $x^*=-2$ and $y^*=0.5$



d. u^* variation in depth at $x^*=-2$ and $y^*=0.625$

Fig. 6. u^* variation in depth at $x^*=-2$

تحت تاثیر مومنتوم جریان ورودی از کانال فرعی قرار گرفته و ابعاد ناحیه جدایش پس از کانال فرعی، نسبت به حالت فاقد دیوار جداکننده کاهش خواهد یافت. این کاهش ابعاد ناحیه جدایش، از میزان افزایش سرعت در ناحیه پس از تقاطع می‌کاهد.

به منظور بررسی این موضوع، در این پژوهش یک جداره به ضخامت ۰/۱ متر در طول کانال جانبی مدل و در بخش میانی آن ایجاد شده (شکل ۹) و با افزودن این ضخامت به بالادست مقطع کانال جانبی، پهنای مفید ۰/۹۱ متر در آن حفظ شده است.

شکل ۸ میدان برداری سرعت $u-v$ در ناحیه اختلاط همراه با دیوار جداکننده در یک نمونه کانال بزرگ مقیاس

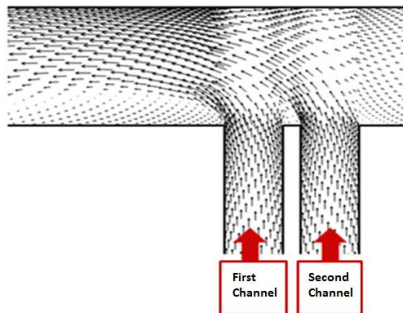


Fig. 8. $u-v$ velocity field in large scale channel with separating wall

طول و ارتفاع این دیوار جداکننده کاملاً مشابه دیوار جانبی کانال فرعی است. ضمن این‌که لبه بالایی این دیوار در مجاورت کانال اصلی، کاملاً تخت ساخته می‌شود. کلیه شرایط مرزی و تنظیمات آن‌ها مشابه مدل‌های پیشین این پژوهش است.

شکل ۹ منحنی‌های هم تراز مولفه سرعت u^* روی صفحه $z^*=0.278$ در ابعاد آزمایشگاهی

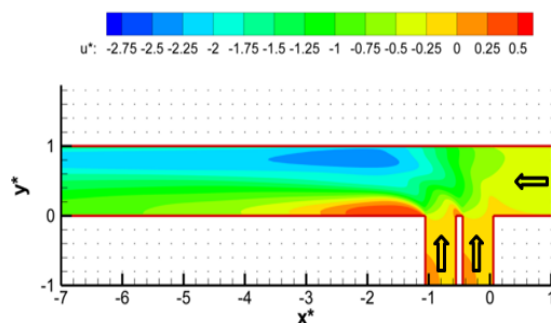
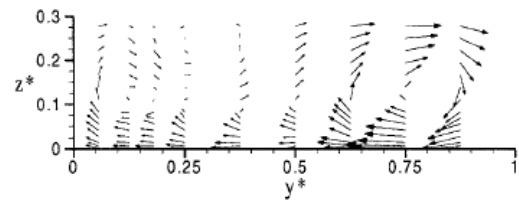
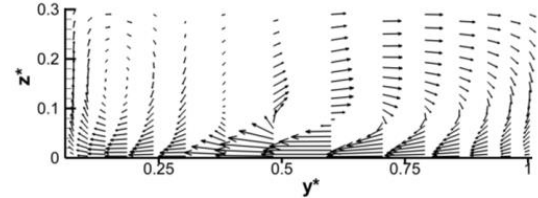


Fig. 9. u^* velocity contours at $z^*=0.278$ in experimental scale

شکل ۷ میدان برداری v^*-w^* در مقطع عرضی $x^*=-2$



a. Experimental results of weber et al. [3]



b. One-phase numerical results

Fig. 7. v^*-w^* velocity field at $x^*=-2$

نظر به اختلاف قابل چشم‌پوشی (بیشینه حدود ۰/۳) مدل‌های عددی تک و دو فازی در زمینه پیش‌بینی بیشینه سرعت u^* پس از تقاطع و در طول کانال اصلی، هماهنگی مناسب منحنی‌های هم‌تراز سرعت مدل عددی تک فاز و نتایج آزمایشگاهی، هم‌خوانی قابل قبول مدل تک فاز و نتایج آزمایشگاهی در تشخیص الگوی توزیع سرعت در عمق کانال و هم‌چنین هزینه بسیار زیاد محاسبات دو فازی، در ادامه پژوهش از حل تک فاز به عنوان جایگزین مدل دو فازی استفاده شده است.

۴- دیوار جدا کننده

همان‌گونه که مطرح شد راهکاری که با هدف کاهش سرعت جریان و آب‌شستگی پس از تقاطع بررسی شده، استفاده از یک دیوار جداکننده در کانال فرعی است. در غیاب دیوار جداکننده، کل جریان کانال جانبی، میدان سرعت در کانال اصلی را تحت تاثیر قرار داده و باعث شکل‌گیری ناحیه جدایش در آن می‌شود. در صورت استفاده از دیوار جداکننده در کانال جانبی (شکل ۸)، جریانی که از مجرای سمت راست (مجرای اول) به کانال اصلی وارد می‌شود، پس از تبادل مومنتوم با جریان کانال اصلی، قصد ایجاد یک ناحیه جدایش در فضای بالای مجرای سمت چپ (مجرای دوم) را خواهد داشت. این در حالی است که جریان مجرای دوم پس از ورود به کانال اصلی و تداخل با جریان‌های کانال اصلی و مجرای اول، تا حد زیادی این ناحیه جدایش را از بین خواهد برد. در نتیجه میدان سرعت کم‌تر

۵- آثار هندسه دیوار جدا کننده بر الگوی جریان کانال اصلی

حفظ پایداری دیوار جداکننده نمونه‌های بزرگ مقیاس در شرایط عملیاتی، افزایش ضخامت آن را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. وجود یک لبه تخت با ضخامتی قابل ملاحظه در فصل مشترک این دیوار با کانال اصلی، فضای کافی برای شکل‌گیری جریان بازچرخشی در بالای دیوار را در اختیار جریان قرار می‌دهد (شکل ۸). به منظور حذف این فضا و اصلاح هندسی لبه بالایی دیوار یاد شده، استفاده از سه هندسه مثلثی، ربع‌دایره و نیم‌دایره (در پلان) در فصل مشترک دیوار با لبه کانال اصلی می‌تواند در دستور کار قرار گیرد. در این پژوهش با هدف ارزیابی اثر این پروفیل‌ها، یک مدل عددی با ابعادی در حد نمونه‌های واقعی از تقاطع، شامل کانال اصلی قبل و بعد از تقاطع به ترتیب به طول‌های ۳۰ و ۴۰ متر و کانال فرعی به طول ۲۰ متر مدل‌سازی شده است. عرض و ارتفاع کانال در هر دو بخش اصلی و جانبی به ترتیب ۴/۶ و ۲ متر در نظر گرفته شده است. ضمن اینکه یک دیوار جداکننده به ضخامت ۰/۶ متر و با ارتفاع و طولی برابر با دیواره‌های کانال جانبی در ناحیه میانی آن قرار داده شده و در سه حالت فوق بررسی شده است. دبی نسبی در این تقاطع نیز برابر با ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب در حالت اول از یک هندسه مثلثی در لبه بالایی دیوار جداکننده استفاده شد. در حالت دوم هندسه نیم‌دایره و در حالت سوم، هندسه ربع‌دایره در وجه پایین‌دست دیوار جداکننده مدل‌سازی شده است. اثر هندسه‌های مختلف لبه دیوار جداکننده بر پروفیل سرعت در این ناحیه و در نزدیکی سطح جریان (ارتفاع $z=1.95$ متر) در شکل (۱۲) نمایش داده شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، استفاده از لبه ربع‌دایره و نیم‌دایره تا حد زیادی از گرادین شدید سرعت در این ناحیه می‌کاهد. همچنین، با به کارگیری دیوار جداکننده، عرض ناحیه جدایش در این حالت نیز حدود ۱۳ درصد کاهش می‌یابد؛ که همان‌گونه که بیان شد، منجر به کاهش مقادیر سرعت پس از تقاطع نیز خواهد شد (شکل ۱۳). خط جریانی کردن هندسه به جمله راه‌کارهایی است که به منظور کاهش نیروهای اعمالی به بدنه جامد و فرسایش در آن مورد توجه قرار می‌گیرد. بدین

شکل (۹) مربوط به منحنی‌های هم‌تراز مولفه سرعت u^* روی صفحه $z^*=0.278$ در یک کانال با دیوار جداکننده جانبی است که کاهش حدود ۹٪ در طول و عرض ناحیه جدایش را نسبت به حالت فاقد دیوار جداکننده (شکل ۴ الف) نشان می‌دهد. استفاده از دیوار جداکننده از یک سو باعث هموار شدن الگوی جریان در کانال اصلی می‌شود و از سوی دیگر، همان‌گونه که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، اثر محسوسی بر افت بیشینه سرعت (به ویژه پس از تقاطع و در نزدیکی آن) در کانال اصلی خواهد داشت.

شکل ۱۰ تغییرات مقدار قدر مطلق سرعت بیشینه u^* در دو حالت دارای دیوار جدا کننده و فاقد آن، در ابعاد آزمایشگاهی

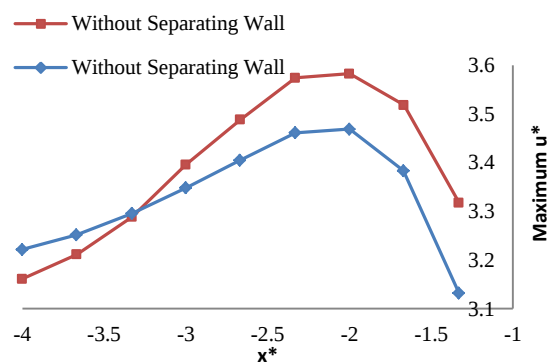


Fig. 10. Variation of maximal absolute u^* in experimental scale

تغییرات مقادیر متوسط چرخش پس از تقاطع، به عنوان معیاری برای قدرت جریان‌های ثانویه، در دو حالت دارای دیوار جداکننده و فاقد آن در شکل ۱۱ مقایسه شده است. کاربرد دیوار جداکننده به طور متوسط باعث کاهش حدود ۷/۵ درصد در مقدار چرخش پس از تقاطع شده است.

شکل ۱۱ تغییرات مقادیر چرخش پس از تقاطع در ابعاد آزمایشگاهی

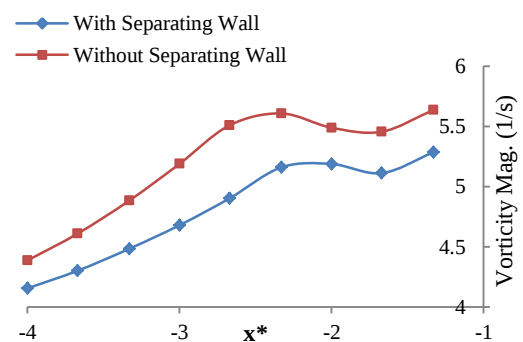


Fig. 11. Vorticity magnitude variation after the junction in experimental scale

که استفاده از پروفیل ربع دایره و نیم دایره به کاهش حدود ۱۴٪ در سرعت کانال اصلی (پس از تقاطع) نسبت به پروفیل تخت منجر شده است. ضمن اینکه پروفیل مثلی قادر به ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مقادیر حداکثر سرعت پس از تقاطع (در مقایسه با پروفیل تخت) نمی‌باشد. این افت قابل ملاحظه بیشینه قدر مطلق حداکثر مولفه سرعت جهت x می‌تواند از پتانسیل آب‌شستگی پس از تقاطع بکاهد. ضمن اینکه استفاده از دو پروفیل یاد شده، منجر به حذف ناحیه جدایش لبه دیوار جداکننده می‌شود.

شکل ۱۳ تغییرات قدر مطلق بیش‌ترین مقدار مولفه سرعت جهت x پس از تقاطع و در پنج حالت مختلف

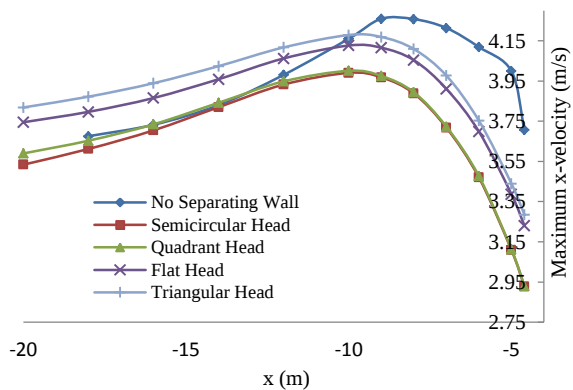


Fig. 13. Variation of maximal absolute x-velocity after the junction in different scenarios

در شکل ۱۴ میانگین درصد کاهش سرعت پس از تقاطع نسبت به حالت فاقد دیوار جداکننده نشان داده شده است. بیش‌ترین کاهش سرعت پس از تقاطع مربوط به حالت دیوار جداکننده با سر نیم‌دایره‌ای و پس از آن ربع دایره است.

شکل ۱۴ میانگین درصد کاهش سرعت پس از تقاطع نسبت به حالت فاقد دیوار جداکننده در چهار حالت مختلف

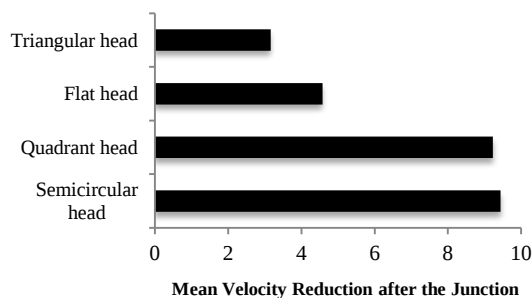


Fig. 14. Mean velocity reduction in comparison with simple channel in different scenarios

ترتیب که مسیر عبور سیال شناسایی شده و تلاش می‌شود تا دیوار بدنه جامد، مشابه مسیر عبور جریان ساخته شود. پس با توجه به مسیر منحنی جریان مجرای سمت راست در ورود به کانال اصلی، پروفیل‌های ربع دایره و نیم دایره‌ای گزینه‌های مناسب‌تری به نظر می‌رسند.

شکل ۱۲ منحنی هم تراز مولفه سرعت جهت x در دیوار جداکننده با لبه‌های مختلف و نیز فاقد دیوار، در ابعاد بزرگ مقیاس

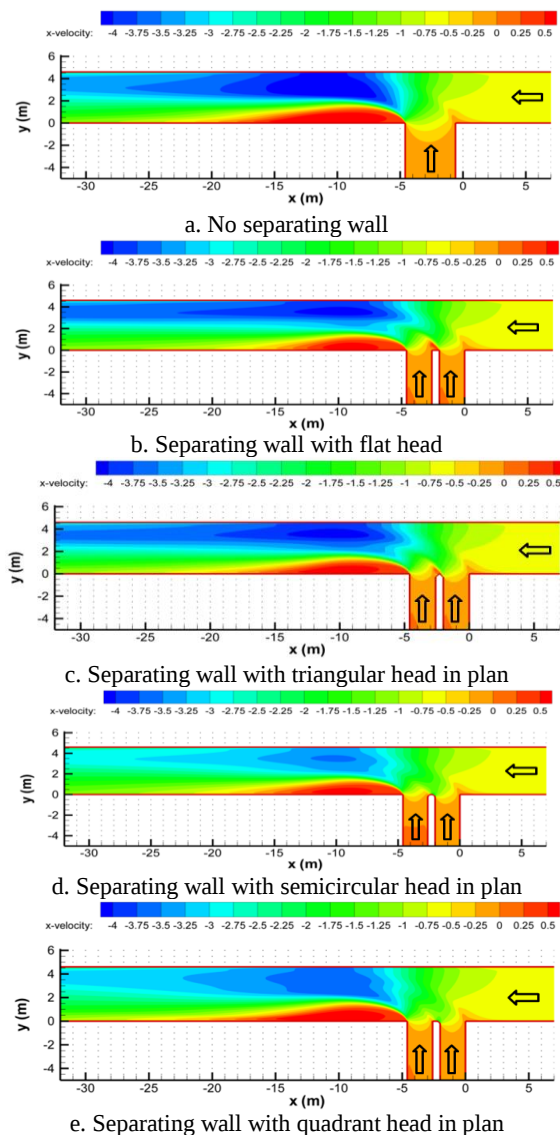


Fig. 12. x-velocity (u) contours in simple large-scale channel and large-scale channels with different separating walls

مقایسه تغییرات قدر مطلق بیشینه مولفه سرعت در جهت x در پروفیل‌های ربع دایره، نیم دایره و تخت (شکل ۱۳) نشان می‌دهد

۶- نتیجه گیری

استفاده از یک دیوار جداکننده در کانال جانبی در تقاطع قائم کانال‌های باز بزرگ مقیاس، علاوه بر مزایای تامین دو مجرای مجزای آب‌دهی در زمینه بهره‌برداری، ضمن کاهش قابل ملاحظه ابعاد ناحیه بازچرخشی، از میزان رسوب‌گذاری در کانال کاسته و همچنین با کاهش بیشینه سرعت جریان بعد از تقاطع، آثار مثبتی بر کاهش آب‌شستگی جریان پس از تقاطع خواهد داشت. هم‌چنین شکل‌گیری جریان گردابه‌ای در مجاورت لبه تخت پهن بالای دیوار جداکننده اجتناب‌ناپذیر است. بر خلاف لبه مثلی، جایگزینی لبه ربع‌دایره و یا نیم‌دایره با لبه تخت نه تنها تقریباً جریان گردابه‌ای بالای دیوار را حذف می‌کند، بلکه منجر به کاهش بیش‌تر حداکثر سرعت پس از تقاطع و کم کردن پتانسیل آب‌شستگی در آن می‌شود.

۷- مراجع

- اصفهان، اصفهان، ۱۳۸۲.
- [۹] محمد امرایی، سعید گوهری، علی فلک دین، "بررسی تاثیر زاویه تقاطع کانال‌ها بر الگوی جریان در کانال‌های مستطیلی." یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ۱۳۹۱.
- [۱۰] صباح محمدی، محمود شفاعی بجستان، "بررسی عمق آب‌شستگی در محل تلاقی کانال‌ها با اتصال لبه گرد." اولین همایش ملی راهبردهای دستیابی به کشاورزی پایدار، دانشگاه پیام نور استان خوزستان، خوزستان، ۱۳۹۰.
- [۱۱] مهدی کرمی مقدم، سید مرتضی سیدیان، محمود شفاعی بجستان، "بررسی الگوی جریان در آبگیر ۹۰ درجه با گرد شدگی ورودی با استفاده از مدل SSIIM2 و مقایسه آن با مدل فیزیکی." چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۷.
- [12] Mohammadiun, S., Salehi Neyshabouri, S. AA., Naser, Gh., Parhizkar, H., Vahabi, H., "Effects of Open-Channel Geometry on Flow Pattern in a 90° Junction." Iranian J. of Science and Technology, Transaction of Civil Eng., 2015, 39(C2+), 559-579.
- [۱۳] سعید محمدیون، سید علی اکبر صالحی نیشابوری، حمید پرهیزکار، حامد وهابی، "بررسی پارامترهای موثر بر صفحات مستغرق بر پتانسیل آب‌شستگی و رسوب‌گذاری جریان در یک کانال باز با تقاطع ۹۰°"، پذیرفته شده در مجله مهندسی آب و محیط زیست ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۲، در دست چاپ.
- [14] FLUENT user's guide manual-version 14, ANSYS Inc, 2011.
- [۱۵] سعید محمدیون، "بررسی عددی الگوی جریان در تقاطع کانال‌های باز مستقیم و قوسی شکل." پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۲.
- [16] Leschziner, M. A., and Rodi, W., "Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow." Journal of the Hydraulics Division, 105(10), 1979, 1297-1314.

- [1] Best, J. L., and Reid, I., "Separation Zone at Open-Channel Junctions." Journal of Hydraulic Engineering, 110(11), 1984, 1588-1594.
- [2] Ramamurthy, A. S., Carballada, L. B., and Tran, D. M., "Combining Open Channel Flow at Right Angled Junctions." Journal of Hydraulic Engineering, 114(12), 1988, 1449-1460.
- [3] Weber, L. J., Schumate, E. D., and Mawer, N., "Experiments On Flow at a 90° Open-Channel Junction." Journal of Hydraulic Engineering, 127(5), 2001, 340-350.
- [4] Huang, J., Weber, L. J., and Lai, Y. G., "Three-Dimensional Numerical Study of Flows in Open-Channel Junctions." Journal of Hydraulic Engineering, 128(3), 2002, 268-280.
- [5] Shamloo, H., and Pirzadeh, B., "Investigation of Characteristics of Separation Zones in T-Junctions." Wseas Transactions on Mathematics, 7(5), 2008, 303-312.
- [6] Zhang, T., Xu, W.-l., and Wu, C., "Effect of discharge ratio on flow characteristics in 90° equal-width open-channel junction." Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 21(4), 2009, 541-549.
- [7] Zeng, C., and Li, C. W., "A hybrid RANS-LES model for combining flows in open-channel T-junctions." Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 22(5), 2011, 154-159.

[۸] سید محمود برقعی، ابوالفضل نظری، علیرضا دائمی، "بررسی آزمایشگاهی الگوی رسوب در تقاطع کانال‌ها." ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی

Effect of Separating Wall Geometry on Flow Pattern of a Large-Scaled 90° Open-Channel Junction

S. Mohammadiun¹, S. AA. Salehi Neyshabouri^{2*}, H. Parhizkar³, H. Vahabi⁴

1- M.Sc. Student of Hydraulic Structural Engineering, Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University, Iran.

2- Prof., Faculty of Civil and Environmental Eng. and Water Eng. Research Center, TarbiatModares University, Iran.

3- Ass. Prof., Aerospace Eng. Dept, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

4- Ph.D. Candidate, Mechanical Engineering Department, College of Engineering, Colorado State University, USA.

Salehi@modares.ac.ir

Abstract:

Open-channel junctions have a broad application in civil and environmental engineering. Formation of a low-pressure zone with recirculating flow (high sedimentation potential) accompanied by a high-velocity zone (high erosion potential) are the most characteristic features of flow in junctions. A large number of researches have been performed to grasp the complicated concept of hydraulic phenomena and correct the related deficiencies in the straight junction of open-channel flows. The interaction between the main and branch flows, causes the main flow to be diverted toward the opposite bank of junction and this interaction creates a separation zone at the downstream corner of the junction. Formation of a three dimensional (3D) separation zone with lower pressure immediately near the branch-side bank is one of the most distinctive characteristics of a flow in open-channel junctions. In addition to, the recirculating flow in this low-pressure zone not only prepares a suitable space for sedimentation which is a common problem in hydraulic structures that can block intakes or junctions, but also increases the velocity near the opposite bank of the main channel and its bed and thereby leads to local erosion. Thus, reducing the sedimentation potential in recirculation zone and eliminating the erosion near the opposite wall of the channel are two major concerns for designers of open-channel junctions. For this purpose, different researches from using submerged vanes in main channel to the geometrical modifications of the junction entrance, have been conducted to improve the flow pattern around the junctions. Therefore, implementing a separating wall in the middle of the branch channel is thoroughly investigated in this research to understand its effect on the flow pattern and also its contribution in reducing the sedimentation and erosion potential in an open-channel junction. Initially, the numerical two-phase model of a previous experimental study, is prepared and its results are validated. Following that, a one-phase model is prepared based on the fact that the difference between maximum and mean elevation of water free surface is less than 10%. According to the negligible (less than 3%) discrepancy between numerical one-phase and two-phase results in predicting the maximum U^* after the junction in channel, acceptable similarity between U^* contours and U^* variation along the flow depth in numerical (one-phase) and experimental studies and considerable increase in computation time of two-phase analysis, one-phase analysis is implemented instead of two-phase one in the rest of this research.

Finally, effects of separating wall are evaluated in a large-scaled industrial 90° open-channel junction and some new geometrical efficiency measurements are devised and assessed to improve the wall performance. Among proposed geometrical modifications on the wall head, semicircular profile had the best performance in reducing the maximum velocity after the junction. The results show a considerable improvement in flow pattern which causes a significant reduction in sedimentation and erosion potential in open-channel junctions.

Keywords: Open-channel junction, Separating wall, Numerical model, Erosion, Sedimentation.