



بررسی آزمایشگاهی و عددی کنتورهای سرعت در کانال با دیواره جداکننده مستغرق

مجتبی طاهری^۱، محمود فغفور مغربی^۲

- ۱- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲- دانشیار گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

Taheri_m@um.ac.ir
magrebi@um.ac.ir

خلاصه

قرارگیری دو کانال در مجاورت یکدیگر در شرایط عملی گوناگونی رخ می‌دهد. در بسیاری از موارد ممکن است نیاز به اجرای دو کانال در مجاورت یکدیگر باشد. این کار نه تنها از لحاظ تقسیم دبی یک کانال واحد به دو کانال مجاور یکدیگر ممکن است مدنظر قرار گیرد، بلکه در طبیعت هم زمانیکه در یک کانال مرکب قسمت سیلابگیر تحت اثر عوامل فرسایشی قرار می‌گیرد، ممکن است دیواره جداکننده‌ای در کانال باقی بماند که عملاً یک کانال اصلی را به دو قسمت تقسیم نموده است. در هر حال عبور جریانهای بیشتر از ظرفیت مجموع دو کانال که می‌تواند به کرات رخ دهد، باعث استغراق دیواره جداکننده میانی می‌گردد. بررسی رفتار هیدرولیکی چنین دیواره‌ای کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور در این تحقیق مدل آزمایشگاهی از دو کانال مستغرق در مجاورت یکدیگر ساخته شده و سپس به بررسی آزمایشگاهی و عددی الگوهای کنتورهای سرعت در بین دو ناحیه تعیین شده توسط دیواره جداکننده پرداخته شد. مشخص است زمانیکه میزان استغراق کم باشد، رفتار هر یک از قسمتهای جدا شده بصورت جداگانه مشابه رفتار یک کانال مجزا می‌باشد. اما زمانیکه درجه استغراق افزایش می‌یابد بعلاوه اندرکنش جریان در طرفین دیواره جداکننده با یکدیگر الگوی سرعت بکلی تغییر می‌نماید. در این مقاله به بررسی موقعیت دیواره جداکننده از نظر مکان قرارگیری، ارتفاع و درجه استغراق آن با استفاده از مدل آزمایشگاهی و مدل عددی نرم افزار فلوئنت پرداخته خواهد شد. از مهمترین نتایج حاصل می‌توان به کاهش نرخ انتقال ممتوم بین دو قسمت مجزا شده با افزایش درجه استغراق دیواره جداکننده نام برد.

کلمات کلیدی: دیواره جداکننده، کنتورهای سرعت، مدل سه بعدی Fluent، زبری جدار، تنش برشی

۱. مقدمه

دبی جریان در کانال‌های باز وابستگی مستقیم با سرعت جریان و مساحت مرطوب سطح مقطع دارد. از طرفی حفظ سرعت جریان در مقادیر بیشتر از سرعت رسوبگذاری در کانال‌ها بسیار حائز اهمیت است. به همین سبب برای جلوگیری از کاهش سرعت جریان به مقادیر کمتر از سرعت رسوبگذاری در انتقال جریانهایی مانند آبهای سطحی که در هنگام بارش تغییرات دبی گسترده‌ای دارند، اقدام به استفاده از کانالهای مرکب می‌شود. یکی از انواع این کانالها، کانالهای مجزای در مجاورت یکدیگر بوده که در شرایطی از سیلاب ممکن است مستغرق شوند. رفتار اینگونه کانالها را می‌توان شبیه به رفتار کانالهای مرکب و رودخانه‌های طبیعی دارای بسترهای سیلابی دانست. در این نوع کانالها جریان در هر یک از دو قسمت کانال به تنهایی می‌تواند وجود داشته باشد و یا این که سطح آب آنقدر بالا بیاید که مجموعه دو قسمت به یک کانال بزرگ با دیواره جداکننده تبدیل گردد. هر کدام از قسمتهای یک کانال با دیواره جداکننده معمولاً تحت شرایط هیدرولیکی جداگانه و فرسایشهای متفاوت قرار می‌گیرند و در عمل زبریهای متفاوتی را دارا خواهند بود. این موضوع سبب می‌شود که کنتورهای سرعت و دبی عبوری در هر کدام از کانالها حتی در صورت یکسان بودن ابعاد با دیگری تفاوت داشته باشند. حال زمانی که این کانالها مستغرق گردند، مشخص کردن آرایش کنتورهای سرعت و همچنین دبی عبوری از آنها به آسانی انجام نخواهد شد.



چیو (۱، ۲) در مورد تعیین توزیع سرعت در دو جهت قائم و عرضی در جریان‌های با سطح آزاد و نائوت (۳)، بالاچاندار و پاتل (۴)، اسمارت و همکاران (۵) در مورد بررسی اثر زبری جدار بر پروفیل‌های سرعت در کانالهای مرکب با مقاطع منظم و نامنظم تحقیقاتی صورت دادند. اما در خصوص تعیین اثرات دیواره جداکننده بر موقعیت کنتورهای سرعت در کانال‌های باز، تحقیقات زیادی صورت نگرفته و تحقیقات گذشته به طور عام در مورد بررسی وضعیت کنتورهای سرعت و شرایط جریان در کانال‌های مستطیلی یا دوزنقه‌ای با مقاطع مرکب یا ساده با جدار زبر یا صاف بوده است. ونگ و چنگ (۶) زبری کف یک کانال مستطیلی را با یک دیواره جداکننده کوچک در کف کانال معادل سازی کردند و سپس به مطالعه اثرات این دیواره مستغرق بر روی کنتورهای جریان اقدام کردند. با توجه به ارتفاع کم دیواره‌ای که محققین فوق برای مدل سازی استفاده کردند، بعضی از پارامترهای اصلی در کانال‌های مرکب مانند انتقال ممتوم ناچیز بوده و از بررسی آن صرف نظر کردند. رودز (۷) نیز به بررسی تاثیرات دیواره‌های مستغرق در جهت عمود بر جریان بر کنتورهای سرعت در یک کانال مستطیلی پرداخت. در این تحقیق به بررسی تاثیر دیواره جداکننده در راستای جریان با نسبت‌های بدون بعد مختلف عمق جریان به ارتفاع دیواره، بر روی گذردهی جریان و کنتورهای سرعت در یک کانال با مقطع مستطیلی پرداخته شده است.

۲. مبانی نظری

اندازه بزرگی سرعت در هر نقطه از کانال رابطه معکوس با میزان مقاومت موثر جریان در آن نقطه دارد. به همین منظور بررسی عوامل تاثیرگذار در میزان مقاومت در مقابل جریان بسیار حائز اهمیت است. عوامل زیادی در میزان مقاومت در برابر جریان دخیل هستند که به راحتی نمی توان اثر هر کدام را به طور جداگانه مورد بررسی قرار داد. لئوولد (۸) مقاومت جریان را به سه عامل مقاومت سطحی، اغتشاشات داخلی و چرخش^۱ جسم سیال ارتباط داده و رز (۹) این مقاومت را در کانالهای منشوری در چهار جزء ۱- مقاومت ناشی از سطح^۲، ۲- رانش شکلی وابسته به شکل مقطع^۳، ۳- مقاومت موجی^۴ ناشی از انحنای سطح و ۴- مقاومت ناشی از شتاب موضعی جریان، طبقه بندی کرد. در کانالهای مرکب معمولاً هر چهار قسم مقاومت ذکر شده موجود هستند. در این گونه کانالها که تحت رژیم طبیعی هستند هر چهار مورد بطور غیر خطی بر هم تاثیر دارند و جدا کردن و یا در نظر گرفتن وابستگی خطی بین آنها صحیح نخواهد بود. در جریان‌های دائمی که تغییرات زمانی در پارامترهای موثر در جریان رخ نمی دهد، یعنی مثلاً سرعت و عمق جریان نسبت به زمان ثابت هستند، $\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial t} = 0$ می باشد که در آن u بیانگر سرعت جریان، h برابر با ارتفاع جریان و t بیانگر زمان است. به همین دلیل در این گونه جریان ها مقاومت ناشی از شتاب موضعی خواهد بود. در یک جریان دائمی تنها اثر دو عامل ۱ و ۲ تعیین کننده خواهد بود. به همین سبب با در نظر نگرفتن تاثیرات موارد ۳ و ۴ از چهار عامل بالا، تنها مقاومت ناشی از سطح جدار و شکل سطح مقطع بررسی خواهند شد. لازم به ذکر است حذف کامل تاثیرات آنها ممکن نخواهد بود.

۲-۱ مقاومت شکل مقطع

رز (۹) با استفاده از ضریب زبری دارسی f و اسیباخ f ، مقاومت را به صورت تابع نمادین بی بعد زیر نشان داد:

$$f = F(\text{Re}, K, \eta', N, \text{Fr}, U') \quad (1)$$

که در آن Re عدد رینولدز، K زبری نسبی، (زبری نسبی معمولاً به صورت k_s/R تعریف می شود که در آن k_s زبری معادل جدار و R شعاع هیدرولیکی جریان است)، η' تابع شکل هندسی سطح مقطع، N غیریکنواختی کانال هم در مقطع طولی و هم در مقطع عرضی، Fr عدد فرود، U' درجه غیر دائمی بودن جریان و F تابع است. معادله سمبولیک (۱) را می توان با استفاده از روابط مختلفی به صورت وابسته به ضریب زبری مانینگ یا به صورت شیب مقاومت جریان k_s نشان داد. رابطه استریکلر عام ترین فرمول از این گروه روابط می باشد که در کانالهای طبیعی کاربرد داشته و به شکل زیر ارائه شده است:

$$n = \frac{d_{50}^{1/6}}{21.1} \quad (2)$$

که در آن n ضریب زبری مانینگ و d_{50} قطر متوسط دانه ها بر حسب متر است. به گونه ای که ۵۰ درصد وزنی ذرات قطری کمتر و ۵۰ درصد وزنی ذرات قطر بیشتر از d_{50} داشته باشند (۱۰).

۱. Spills

۲. Surface friction

۳. Form drag

۴. Wave resistance



۲-۲ مقاومت سطح

جدارهای مختلف متناسب با اندازه زبری سطحشان اثرات متفاوتی بر روی کنتورهای سرعت دارند. ین (۱۱) اعتقاد دارد که اثر مقاومت سطح بر روی کنتورهای سرعت را می‌توان به تئوری لایه مرزی در مکانیک سیالات مرتبط دانست. وی تنش برشی درونی τ_{ij} را متناسب با لزجت دینامیکی و گرادین سرعت دانست و این رابطه را به صورت زیر بیان کرد:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

که در آن μ لزجت دینامیکی آب، u_i و u_j به ترتیب معرف مولفه سرعت محلی در جهت x_i و x_j و i و j بردارهای واحد می‌باشند. در مرزهای جدار کانال تنش برش محلی برای هر نقطه از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\tau_o = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (4)$$

در این رابطه y فاصله عمود بر جدار و u معرف سرعت است. توزیع سرعت نیز عموماً متناسب با هندسه کانال می‌باشد. سطح آزاد جریان که در تماس با هوا است نیز اثراتی بر کنتورهای سرعت داشته و سبب تولید گرادین سرعت در سطح می‌شود. میاموتو (۱۲) دامنه تاثیر مقاومت سطح آزاد بر میدان جریان را حدود بیست درصد ارتفاع جریان از سطح آزاد تعیین کرد.

۳ مواد و روشها

۳-۱ مدل عددی

برای شبیه سازی میدان سیال از نرم افزار Fluent برای یک جریان سه بعدی استفاده شد. با توجه به مشخصات ابعادی و شرایط هیدرولیکی فلوم آزمایشگاهی از المانهای ۴ گرهی استفاده گردید. برای شبیه سازی حرکت سیال در داخل کانال، جریان به صورت دو فازی- آب و هوا- با استفاده از روش VOF مدل شد. این مدل بر این حقیقت استوار است که دو یا چند فاز سیال در حال مدل سازی با یکدیگر واکنش ندارند (۱۳). برای هر کدام از فازها، متغیری به نام حجم جزیی فاز در نظر گرفته شد. این متغیر در درون هر سلول و برای هر فاز به صورت جداگانه مورد محاسبه قرار گرفت. بر این اساس، اگر حجم جزیی فاز آب در سلول مورد نظر را با α_w نمایش دهیم، آن گاه سه حالت امکان وقوع خواهند داشت: الف) $\alpha_w = 0$ حجم آب در سلول برابر صفر، ب) $\alpha_w = 1$ آب حجم سلول را پر کرده و ج) $0 < \alpha_w < 1$ آب و هوا حجم سلول را پر کرده‌اند. بر اساس مقدار محلی α_w که از حل معادلات پیوستگی حجم جزیی برای هر سلول حاصل می‌شود پارامترهای متغیر در هر سلول سیال، مشخص می‌شود.

۳-۱-۱ معادلات حجم جزیی

حجم محصور شده توسط آب در هر سلول از حل معادله پیوستگی برای حجم جزیی فاز آب به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$\frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_w \rho_w) + \nabla \cdot (\alpha_w \rho_w \mathbf{v}_w) \right] = \frac{1}{\rho_w} \left[S\alpha_w + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{wa} - \dot{m}_{aw}) \right] \quad (5)$$

در رابطه بالا \dot{m}_{wa} برابر با جرم انتقالی از فاز آب به فاز هوا و \dot{m}_{aw} برابر با جرم انتقالی از فاز هوا به فاز آب است. عبارت $S\alpha_w$ در سمت راست معادله برابر با مقاومت ممتوم فاز آب است که در ابتدای حل صفر در نظر گرفته شد و \mathbf{v}_w نیز سرعت حرکت حجم آب است. در مورد فاز اولیه یا هوا، معادلات مربوط به حجم جزیی مورد حل قرار نگرفته و با استفاده از قانون اجتماع مقادیر جزیی ($\sum_{w=1}^n \alpha_w = 1$)، مقادیر مربوط به حجم جزیی فاز هوا تعیین می‌شود.

۳-۱-۲ معادلات ممتوم

معادله ممتوم به صورت مجزا برای فاز آب و هوا در سراسر دامنه حل شده و سرعت نهایی منتج شده به فازها نسبت داده می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (6)$$



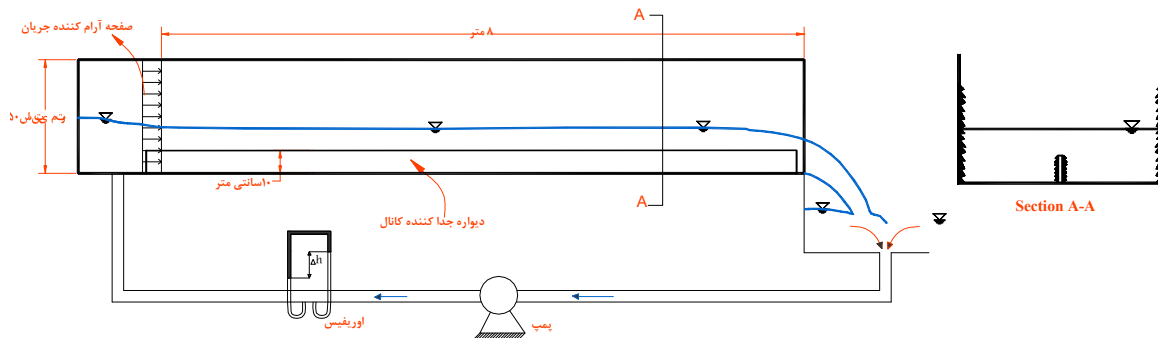
در رابطه اخیر F مجموع نیروهای خارجی، ρ جرم حجمی سیال، p فشار سیال و v بردار سرعت در راستای جریان است. تعیین اندازه نیروی کشش سطحی بر اساس روش نیروی سطحی پیوسته^۱ (CSF) که توسط برک بیل و همکاران (۱۴) ارائه شده است، طبق رابطه زیر می‌باشد:

$$p_2 - p_1 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (7)$$

که در آن p_1 و p_2 مقادیر فشار فازها (آب و گاز) در طرفین سطح مشترک، σ ضریب کشش سطحی، R_1 و R_2 دو شعاع قوس انحنا سطح می‌باشند.

۲-۳ مدل آزمایشگاهی

برای انجام آزمایشات از کانال موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شد. این کانال، یک کانال آزمایشگاهی با جداره‌های شیشه‌ای و کف فلزی به طول ۸ متر، عرض مقطع 40 cm و ارتفاع 50 cm می‌باشد (شکل ۱). برای مدل سازی حالت مستغرق از دیواره جداکننده که درون کانال قرار داده شده بود، استفاده شد. جنس دیواره های خارجی از شیشه و دیواره جداکننده و کف نیز از جنس پلکسی گلس بود. کلیه حالتها نیز با شیب $S=0/0006$ در نظر گرفته شد. شرایط هیدرولیکی جریان در کانال نیز به صورت یکنواخت و دائمی تنظیم شد. آزمایشات بر روی مدل در نسبتهای بدون بعد عرض به عمق کلی جریان (B/H) برابر با 4 ، $2/67$ ، 2 و $1/6$ در دو موقعیت کانال صاف و زیر شده و مجموعاً در ۱۴ حالت صورت پذیرفت. جزئیات هر آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است که در آن n_R اندازه ضریب زبری مانینگ در کانال سمت راست و n_L در کانال سمت چپ می باشد.

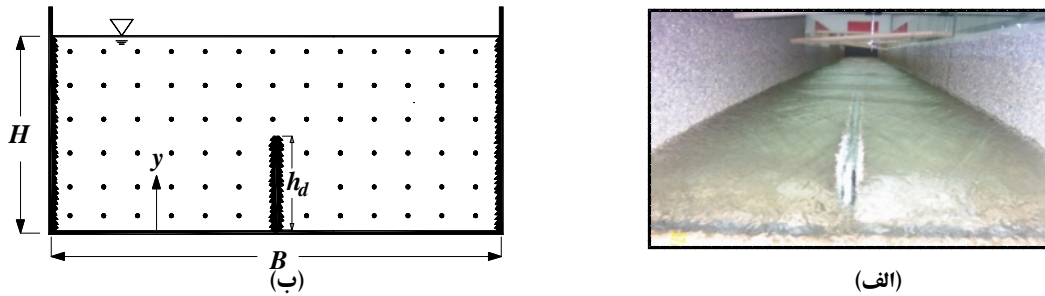


شکل ۱- کانال با دیواره جداکننده مستغرق

جدول ۱- معرفی حالات مختلف آزمایش

شماره	$H(\text{cm})$	$h_d(\text{cm})$	n_R	n_L
R1	۲۵	۵	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸
R2	۲۰	۵	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸
R3	۱۵	۵	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸
R4	۱۰	۵	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸
L1	۲۵	۵	۰/۰۰۸	۰/۰۱۸
L2	۲۰	۵	۰/۰۰۸	۰/۰۱۸
L3	۱۵	۵	۰/۰۰۸	۰/۰۱۸
L4	۱۰	۵	۰/۰۰۸	۰/۰۱۸
L5	۲۵	۱۰	۰/۰۰۸	۰/۰۱۸
L6	۲۰	۱۰	۰/۰۰۸	۰/۰۱۸
L7	۱۵	۱۰	۰/۰۰۸	۰/۰۱۸
R5	۲۵	۱۰	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸
R6	۲۰	۱۰	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸
R7	۱۵	۱۰	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸

شبکه برداشت در سطح مقطع نیز به شکل کاملاً منظم و متقارن در نظر گرفته شد. آزمایشات در دو سری R و L انجام شد که سری R معرف حالت‌هایی هستند که در هر دو کانال جدارهای عمودی زیر شده‌اند و سری L معرف حالت‌هایی هستند که تنها در کانال سمت چپ جدارهای عمودی زیر شده‌است. برای زبر کردن جدارها، ماسه با دانه‌بندی یکنواخت بین دو الک استاندارد $۲/۳۶$ و $۴/۷۵$ میلیمتری غربال شد تا دانه‌های با قطر $d_{50} = ۳/۵^{mm}$ که با استفاده از رابطه ۲ معادل ضریب مانینگ برابر با $۰/۰۱۸$ می‌باشد، بدست آید. سپس با استفاده از چسب، دانه‌های ماسه بر روی نوارهای شیشه‌ای ثابت گردید. برای اندازه‌گیری سرعت از پروپلر مینیاتوری سرعت بالا با مدل ۴۰۴ و نمایشگر دیجیتال استفاده شد. در این آزمایشات سرعت در هر ده ثانیه یک مرتبه و برای هر نقطه شش مرتبه برداشت شد. میانگین سرعت برداشت شده به عنوان متوسط سرعت برای هر نقطه در نظر گرفته شد.

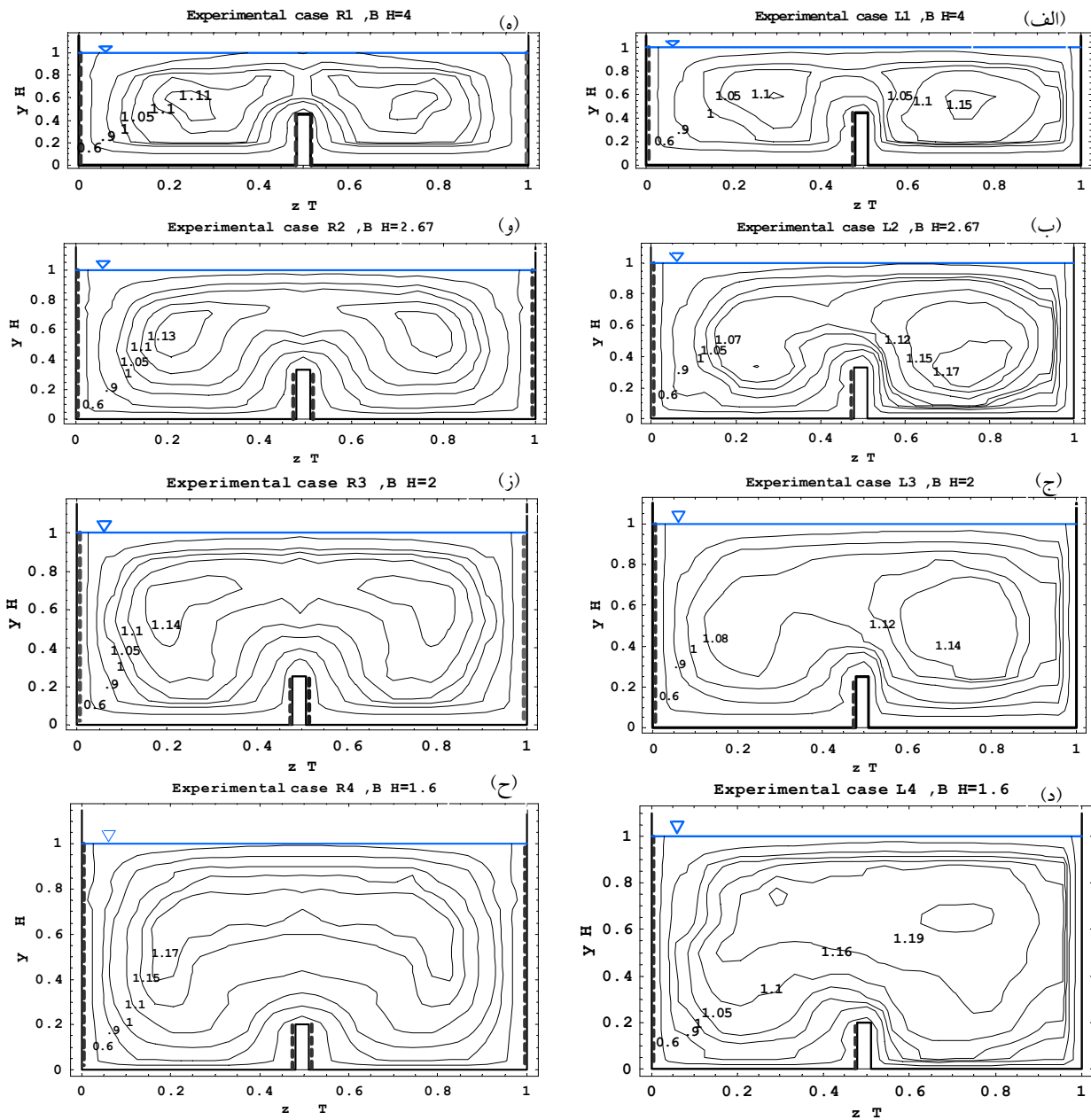


شکل ۲- (الف) مقطع کانال آزمایشگاهی (ب) موقعیت نقاط اندازه‌گیری سرعت در مقطع کانال

۴. بررسی نتایج

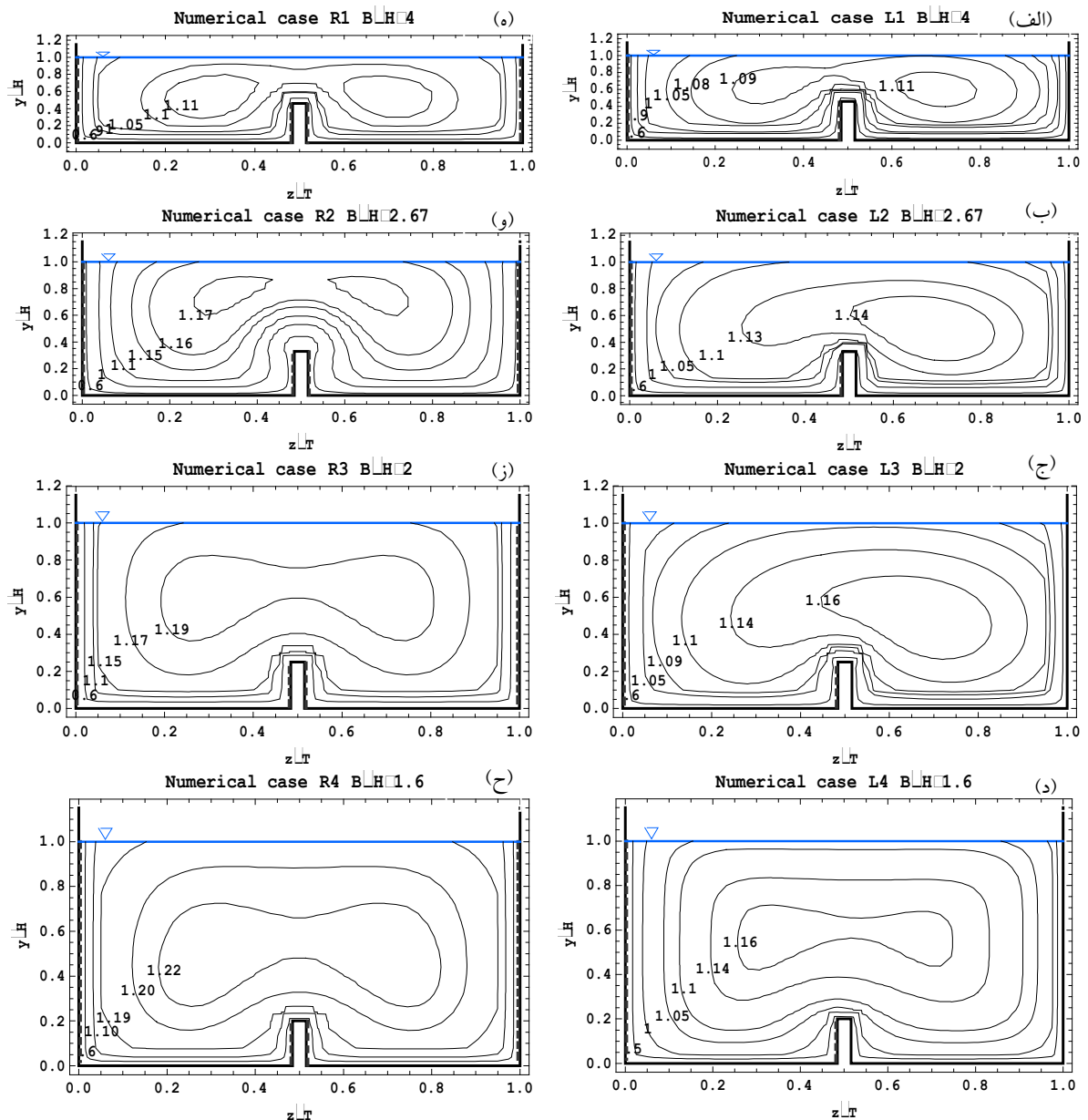
شکل ۳ مربوط به کنتورهای سرعت آزمایشگاهی است که در آن زبری جدار کانالها با استفاده از نوارهای خط چین نمایش داده شده است. تمام مقادیر در ترسیم کنتورهای سرعت بدون بعد شده‌اند تا مقایسه و تحلیل نتایج به سهولت انجام شود. نتایج حاصله نشان داد که با کاهش B/H (اشکال ۳- الف و ب) موقعیت حداکثر سرعت به عمق‌های پایین‌تر منتقل شده و همچنین مقدار حداکثر سرعت بدون بعد شده افزایش یافته است (اشکال ۳- ج و د). با زبر شدن جدارهای دو کانال گرادیان سرعت که عامل ایجاد جریان برش می‌باشد، کاهش یافته است (اشکال ۳- و ب). همچنین در B/H های زیاد تاثیرگذاری زبری جدار یک قسمت بر روی کنتورهای سرعت در قسمت دیگر اندک می‌باشد. برای مثال در $B/H=۴$ (اشکال ۳- الف و ه) دو نقطه ماکزیمم سرعت در طرفین کانال دیده می‌شود که با کاهش میزان B/H به $۲/۶۷$ و ۲ (اشکال ۳- ب و ج) این نقاط حداکثر سرعت به سمت یکدیگر و مرکز کانال دارای دیواره کشیده می‌شوند و در $B/H=۱/۶$ این نقاط به هم متصل شده‌اند (اشکال ۳- د و ح). در بالای دیواره جداکننده و در وسط کانال، اندازه کنتورهای سرعت به سرعت ماکزیمم نرسیده و اختلاف زیادی با میزان سرعت ماکزیمم در کانال دارند. این موضوع نشان از وجود آشفتگی و اغتشاش جریان در بالای دیواره به دلیل ایجاد جریان‌های برشی قوی دارد که سبب کاهش اندازه سرعت ماکزیمم می‌شود. به همین دلیل می‌توان گفت که اندازه جریان‌های ثانویه ایجاد شده در روی دیوار جدا کننده بواسطه تنش برشی حاصل از هندسه کانال در $B/H=۲/۶۷$ و $B/H=۴$ میزان قابل توجهی می‌باشد (اشکال ۳- الف و ب). با کاهش میزان B/H ، تولید جریان‌های ثانویه روی دیوار جدا کننده کاهش یافته و در نتیجه کنتورهای سرعت در روی دیوار جدا کننده به یکنواختی بیشتری نسبت به مرکز کانال رسیده‌اند. باید توجه کرد که این موضوع ناشی از حذف تاثیرات دیوار جدا کننده در B/H های کم نیست، بلکه به دلیل افزایش پهنه میدان جریان و در نتیجه کمتر شدن اثرات دیوار در کل میدان جریان می‌باشد.

مقایسه کنتورهای سرعت در اشکال ۳- د و ح، نشان می‌دهد که افزایش متقارن سطح زبر شده در کل محیط مرطوب دو کانال مستغرق در مجاور یکدیگر در آزمایشات سری L نسبت به آزمایشات سری R ، سبب توزیع متقارن‌تر سرعت در مقطع هر دو کانال گردیده است. البته باید دقت داشت که علی‌رغم این موضوع میانگین سرعت قرائت شده در کل سطح مقطع کاهش یافته است. این توزیع متقارن‌تر سرعت سبب شده است که گرادیان سرعت در کل مقطع کاهش یافته و جریان برش ایجاد شده در آزمایشات سری R نسبت به آزمایشات سری L ضعیف‌تر باشد. همچنین بررسی این دو شکل نشان می‌دهد که هرچه زبری‌ها در جدار کانال بیشتر شود، کنتورهای سرعت به سمت مناطق مرکزی جریان کشیده خواهند شد که در نتیجه سبب می‌شود موقعیت سرعت حداکثر، از جدار دور شود. فاصله کنتورهای $۰/۶$ و $۰/۹$ از جدار در اشکال ۳- ج و د، نشان می‌دهد که در نزدیک جداره در کانال راست این فاصله کم شده و در کانال چپ و در نزدیک جداره فاصله بین این دو کنتور سرعت زیاد می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که جداره-ها در کانال راست صاف بوده و در کانال چپ جداره‌ها زبر می‌باشد که منطبق بر شرایط آزمایش است.



شکل ۳- کنتورهای سرعت بدون بعد آزمایشگاهی

شکل ۴ مربوط به کنتورهای سرعت عددی است که در آن زبری جدار کانالها با استفاده از نوارهای خط چین نمایش داده شده است. همانند شکل ۳ تمام مقادیر در ترسیم کنتورهای سرعت بدون بعد شده‌اند تا مقایسه و تحلیل نتایج به سهولت انجام شود. با مقایسه اشکال ۴- الف و ه، رویت می شود که با زبر شدن جدارهای دو کانال گرادبان سرعت که عامل ایجاد جریان برش می باشد، کاهش یافته است. در B/H های زیاد تاثیر گذاری زبری جدار یک قسمت بر روی کنتورهای سرعت در قسمت دیگر اندک می باشد. برای مثال در $B/H=4$ (اشکال ۴- الف و ه) دو نقطه ماکزیمم سرعت در طرفین کانال دیده می شود که با کاهش میزان B/H به $2/67$ و 2 (اشکال ۴- ب و ج) این نقاط حداکثر سرعت به سمت یکدیگر و مرکز کانال دارای دیواره کشیده می شوند و در $B/H=1/6$ این نقاط به هم متصل شده‌اند (اشکال ۴- د و ح). در آزمایشات سری L به دلیل تفاوت زبری جدار در دو کانال، گرادبان سرعت و در نتیجه تنش های برشی تولید خواهد شد. اثرات مربوط به این تنش ها به اثرات ناشی از تنش های برشی حاصل از دیوار جداکننده افزوده خواهد شد و مجموع این تنش ها سبب تولید هسته های جریان های ثانویه خواهد شد. فاصله کنتورهای $0/6$ و $0/9$ از جدار در اشکال ۴- ج و د، نشان می دهد که در قسمت راست کانال این فاصله کم شده و در قسمت چپ فاصله بین این دو کنتور زیاد می شود. این موضوع نشان می دهد که جدارها در قسمت راست صاف بوده و در قسمت چپ کانال زبر می باشد که منطبق بر شرایط آزمایش است. همچنین در آزمایشات سری L با کاهش B/H ، یکنواختی سرعت در کل کانال افزایش پیدا کرده است.



شکل ۴- کنتورهای سرعت بدون بعد عددی

مقایسه شکل ۳ و ۴ که مقایسه کنتورهای سرعت آزمایشگاهی و عددی است، نشان از تطابق و همگرایی نتایج اخذ شده دارد. مقایسه اشکال ۳-ه و ۴-ه نشان می‌دهد که اندازه سرعت ماکزیمم در دو حالت با یکدیگر برابر بوده و موقعیت نسبی کنتورهای سرعت در هر دو حالت شباهت زیادی با هم دارد. بررسی اشکال ۳-د و ۴-د نشان می‌دهد که اندازه سرعت ماکزیمم حاصل از نتایج آزمایشگاهی و عددی تفاوت اندکی با یکدیگر دارد. همچنین موقعیت نسبی کنتورهای هم ارزش و آرایش کلی کنتورها در کل مقطع در دو شکل، دارای تفاوت‌های محسوس شده است. این موضوع نشان از کاهش تطابق نتایج عددی و آزمایشگاهی با افزایش B/H می‌باشد.

۵. نتیجه گیری

نتایج اخذ شده از بررسی و مقایسه کنتورهای آزمایشگاهی و عددی در دو کانال مستغرق در مجاورت یکدیگر به صورت زیر می‌باشد:

۱. با کاهش B/H در دو کانال در مجاورت یکدیگر و با جداره مستغرق و با زبری یکسان در دو قسمت، موقعیت حداکثر سرعت به H/H (های پایین تر منتقل می‌شود، فاصله نقطه سرعت ماکزیمم از جدار کانال افزایش می‌یابد، نقطه سرعت ماکزیمم به وسط کانال نزدیک شده و اندازه



- سرعت ماکزیمم افزایش خواهد یافت.
۲. به هر میزان سهم محیط زبر شده نسبت به کل محیط مرطوب کانال افزایش یابد، کنتورهای سرعت به سمت مناطق مرکزی جریان کشیده خواهند شد که در نتیجه سبب می شود موقعیت سرعت حداکثر از جدار دور شود.
 ۳. کانال‌های با جدار مستغرق اساساً استعداد ایجاد هسته‌های جریان ثانویه قوی را دارند. جریانهای ثانویه نیز باعث کشیده شدن سرعت حداکثر به داخل جریان می شود. اما تأثیر دیواره جداکننده به عنوان یک زبری در کف به طور مستقیم برعکس این فرآیند عمل می کند. هرچه زبری‌ها در بستر کانال بیشتر شود باعث کشیده شدن کنتورهای سرعت به سمت مناطق نزدیک تر به سطح می شود. در مقاطع حاضر اندرکنش این دو فعالیت در سطح مقطع جریان تعیین کننده‌ی موقعیت سرعت حداکثر خواهد بود.
 ۴. تأثیر سلولهای آشفتگی بر روی کنتورهای سرعت بالای دیواره جداکننده بیانگر این موضوع است که با کاهش B/H در ابتدا جریانهای ثانویه تولید شده در روی دیواره جداکننده افزایش می یابد. سپس با کاهش بیشتر میزان B/H ، اثر جریانهای ثانویه بر روی اندازه و موقعیت کنتورهای سرعت کاهش خواهد یافت.
 ۵. در تمامی حالات موقعیت حداکثر سرعت در زیر سطح آزاد آب اتفاق می افتد. مهمترین عامل این موضوع وجود جریانهای ثانویه قوی در مقطع تحت تأثیر دیواره جدا کننده و توزیع غیر یکنواخت زبری در جدار کانال است.
 ۶. با کاهش میزان B/H اختلاف سرعت در آزمایشات سری L در دو کانال کمتر خواهد شد. تا جایی که در $B/H=1/6$ این میزان به حدود صفر می رسد. این موضوع مشخص می کند که نرخ انتقال ممنوم ناشی از اختلاف سرعت در B/H های کم ناچیز است.
 ۷. مقایسه کنتورهای سرعت آزمایشگاهی و عددی نشان از تطابق و همگرایی نتایج اخذ شده دارد. این موضوع در B/H های زیاد بیشتر قابل لمس بوده و با کاهش B/H تطابق نتایج عددی و آزمایشگاهی کاهش می یابد.

۶. مراجع

1. Chiu, C.L., (1989), "Velocity distribution in open channel flow", J. Hydraul. Eng., ASCE, 115(5), pp 576–594.
2. Chiu, C.L., (1996), "A natural law of open-channel flows", Stochastic Hydraul. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 15–27.
3. Naot, D. and Nezu, I. and Nakagawa, H., (2004), "Hydrodynamic behavior of compound rectangular open channels", J. Hydraul. Eng., ASCE, 119(3), pp 390–408.
4. Balachandar, R. and Patel, V.C., (2002), "Rough wall boundary layer on plates in open channels", J. Hydraul. Eng., 128(10), pp 947–951.
5. Smart, G., (1992), "Stage-discharge discontinuity in composite channels", J. Hyd. Res., Delft, Netherlands, 30(6), pp 817–833.
6. Wang, Z.Q. and Cheng, N.S., (2005), "Secondary flows over artificial bed strips", ASCE, 28, pp 441–450.
7. Rhodes, D.G. and Senior, K.A., (2000), "Numerical study of resistance with rib roughness of various scales", J. Hydraul. Eng. 126(6).
8. Leopold, L.B. and Wolman, M.G. and Miller, J.P., (1964), "Fluvial processes in geomorphology", Freeman, San Francisco.
9. Rouse, H., (1965), "Critical analysis of open-channel resistance", J. Hydraul. Eng., 105(2), pp 1–25.
10. Henderson, F.M., (1966), "Open channel flow", Macmillan, Newyork.
11. Yen, B.C., (2002), "Open channel flow resistance", J. Hydraul. Eng., Vol. 128, No.1.
12. Miyamoto, H. and Kanda, T., (2002), "Simulation image measurements of velocity field and water – surface wave in open channel flows", Proc. "Hydraulic measurements & experimental methods conference 2002, ASCE, Colorado.
13. Hirt, C.W., (2000), "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", J. Comput. Phys. Vol. 201, No. 39.
14. Brackbill, J.U. and Kothe, D.B. and Zemach, C.A., (1992), "Continuum method for modeling surface tension", J. Comput. Phys., Vol. 100, pp 335-354.