

بررسی و مدل‌سازی تأثیر تزریق رسوب بر طول ناحیه جدایی جریان عبوری از تلماسه‌ها

محمد رضا تقی‌زاده^۱، آرتمیس معتمدی^{۲*}، مجید گلوئی^۱ و فواد کیلانته‌ئی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۲۵)

چکیده

شناخت رفتار جریان عبوری از روی شکل‌های مختلف بستر، یکی از پیچیده‌ترین مباحث مهندسی رسوب است. با وجود مطالعه‌های متعدد در زمینه مورفولوژی رودخانه‌ها، همچنان درک برهمکنش بین جریان و شکل‌های گوناگون بستر در آب‌های گل‌آلود و حاوی رسوب بسیار ضعیف است. مطالعه حاضر به طور عمده بر شبیه‌سازی جریان با نرم‌افزار SSIIM بر روی تلماسه‌ها و تأثیر جریان صاف و غلیظ بر ابعاد ناحیه جدایی جریان متمرکز است. در این پژوهش، جریان گذرنده از یک کانال به طول ۱۲ متر با ۹ تلماسه متوالی به طول ۱ متر و ارتفاع ۴ سانتی‌متر مدل‌سازی شد. ۹ شبیه‌سازی برای بررسی اثر سرعت جریان حاوی رسوب و زلال انجام شد و در نهایت برای اعتبارسنجی، اندازه ناحیه جدایی جریان حاصل از مدل، با نتایج تجربی پژوهشگران پیشین که با دستگاه PIV اندازه‌گیری شده بود، مقایسه شد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد، طول ناحیه جدایی جریان با افزایش سرعت، افزایش داشته و بیشترین احتمال وقوع جدایی جریان در بیشترین سرعت رخ می‌دهد. در جریان گل‌آلود، جدایی جریان کمتر از شرایط مشابه در جریان زلال است و با افزایش چگالی سیال، طول ناحیه جدایی جریان کاهش می‌یابد. این پژوهش کارکرد قابل قبول نرم‌افزار SSIIM و دقت آن در برآورد رفتار جریان با رسوب و بدون رسوب را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: نرم‌افزار SSIIM، ناحیه جدایی جریان، تلماسه، جریان با رسوب

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲. گروه مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، قزوین، ایران

*. مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: artemis.mot@bzte.ac.ir

مقدمه

بررسی منطقه جدایی جریان، در بسیاری از پروژه‌ها از جمله پروژه‌های که در مدفون ساختن لوله‌های نفت در بستر رودخانه‌ها و حفاظت از آن‌ها از متمرکزند، بسیار حائز اهمیت بوده و از نظر تأثیر عمق و دبی جریان مورد مطالعه قرار می‌گیرند. همچنین تأثیر مورفولوژی بر جدایی جریان از دیدگاه سایر علوم، نظیر مباحث زیست‌محیطی و بررسی محل تخم‌ریزی ماهی‌ها نیز مورد توجه بوده است. به دلیل اینکه در شرایط طبیعی رودخانه، آب همواره صاف نیست و با توجه به بار بستر و بار معلق انتقالی از بالادست به پایین‌دست رودخانه، جریان گذرنده از مقاطع مختلف رودخانه گل‌آلود است، بنابراین در این پژوهش علاوه بر شناخت مکانیزم برهمکنش جریان و شکل بستر، به تأثیر انتقال رسوب بر ناحیه جدایی جریان پرداخته شده است. لازم به ذکر است این پژوهش به علت فقدان تجهیزات آزمایشگاهی مورد نیاز، تاکنون در پژوهشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی کشور انجام نشده است.

پیرت (۲۴) با مطالعه روی مکانیزم پیدایش انواع شکل بستر به این نتیجه رسید که انتقال رسوب در رودخانه‌ها و محیط‌های آبی، به مرور زمان سبب تشکیل پدیده‌های موج‌دار روی بستر رودخانه‌ها شده است. مشخصات دینامیکی و ابعاد مربوط به بستر، نشان‌دهنده تأثیر فرایندهای پویای هیدرودینامیکی و رسوبی در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی هستند. برای نمونه ابعاد و مشخصات هندسی بستر، نشان‌دهنده ذات و طبیعت حرکت رسوبات است؛ بنابراین مشخص کردن مورفولوژی و پویایی شکل بستر به منظور برآورد و پیش‌بینی درست میزان انتقال رسوب و تغییرات ریخت‌شناسی ضروری است. ونیدی (۳۱) گزارش کرد، بی شک شکل بستر تأثیر به‌سزایی بر روی شرایط جریان دارد. همچنین برای داشتن یک درک مناسب از سیستم، مدل کردن رفتار رودخانه و انتقال رسوب نیاز است که مشخصه‌های بستر و جریان آن مورد بررسی قرار گرفته و شناخته شود.

دی و همکاران (۸) با بررسی ساختار جریان متوسط و متلاطم بر روی تلماسه‌های شنی دویعدی با بستر ثابت و با

رودخانه‌ها و کانال‌های طبیعی از جمله مهم‌ترین عناصر زیست‌محیطی موجود در زمین هستند که بر کیفیت زندگی انسان و دیگر موجودات زنده تأثیر مستقیم و غیرمستقیم می‌گذارند. ایجاد هرگونه تغییر در رژیم جریان رودخانه، می‌تواند موجب اختلال در وضعیت اجتماعی - اقتصادی حاشیه‌نشینان شود. در جریان‌های کانال باز با بستر ثابت، محاسبه دبی چندان کار پیچیده‌ای نیست؛ زیرا می‌توان مقدار ثابتی را به‌عنوان ضریب زبری تخمین زد (۲ و ۲۹) و در نهایت با استفاده از یکی از فرمول‌های مقاومت جریان، دبی را برآورد کرد (۹). در رودخانه‌های طبیعی با بسترهای آبرفتی، تغییر شکل بستر می‌تواند مقاومت جریان را افزایش دهد که این امر خود ممکن است با تغییر ساختار جریان منجر به تغییر ناهمواری ذرات و شکل بستر شود (۴، ۱۱، ۱۳ و ۲۶). یکی از زیر شاخه‌های مهندسی رودخانه، مهندسی رسوب و فرسایش است که مجموعه اقدامات مربوط به شناخت و درک رسوب‌گذاری و فرسایش است. از جمله این موارد می‌توان به نرخ انتقال بار بستر و معلق، برداشت رسوب موجود در مقاطع بحرانی که موجب پایداری شکل بستر و متعاقب آن پایداری رودخانه‌هاست، اشاره کرد. چگونگی ایجاد و توسعه‌ی شکل بستر و پایداری آن، یکی از موضوعات مهم و چالش برانگیز مربوط به علم رسوب و فرسایش است که با توجه به عدم قطعیت و پارامترهای زیاد تأثیرگذار بر آن، یک مدل ریاضی یا روش قطعی برای برآورد نرخ انتقال رسوب در دسترس نیست. تقریباً همزمان با شروع حرکت ذرات بستر در رودخانه‌ها، فرم‌های مختلف بستر شروع به شکل‌گیری می‌کنند. از رایج‌ترین شکل‌های بستر در رودخانه‌های آبرفتی، بسترهای متحرک پوشیده از شکنج‌ها و تلماسه‌ها است (۷ و ۲۲). تلماسه‌ها که در این پژوهش مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته‌اند، شامل اشکال بستری هستند که مقطع آن‌ها با پروفیل سطح آب ناهمگام است و در محدوده وسیعی از ذرات بسیار ریز و درشت ماسه (۳ و ۲۷) تا ذرات درشت شن (۱۰) می‌توانند تشکیل گردند.

آزمایش تأثیر مورفولوژی شکل بستر بر سرعت جریان و

سرعت جریان عبوری از روی تلماسه بسیار ضروری است که در پژوهش‌های افضل‌ی مهر و همکاران (۱) و نصیری دهرسخی و همکاران (۲۱)، به طور مبسوط ارائه شده است. شناخت برهمکنش‌هایی که در کنترل و تخمین حرکت تلماسه، حمل رسوبات و مدل‌سازی جریان رودخانه‌های طبیعی مؤثر است، اغلب با جمع‌آوری داده‌های مفید و بر پایه بررسی تلماسه‌های ثابت ممکن می‌شود. داده‌های اندازه‌گیری شده جدایی جریان با استفاده از PIV و بررسی ناحیه جدایی در پژوهش‌های آزمایشگاهی معتمدی (۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰)، بستر مناسبی برای مطالعه شبیه‌سازی جریان فراهم کرده است. در پژوهش شریفی و همکاران (۲۵) برای اعتبارسنجی کاربرد و بررسی دقت مدل‌های آشفتگی، منطقه جدایی جریان با استفاده از مدل‌های آشفتگی LES, RANS و DES شبیه‌سازی شد و نتایج با مدل‌های آزمایشگاهی معتمدی و داده‌های ثبت شده با دستگاه PIV مقایسه شد. معادلات تجربی بدست آمده برای تخمین ابعاد جداسازی جریان نشان داد، ابعاد ناحیه جدایی جریان با زاویه جانبی پایین‌دست تلماسه‌ها ارتباط معنی‌داری دارد. لازم به ذکر است با وجود اینکه تعداد زیادی کار پژوهشی و آزمایشگاهی روی شکل بستر، تاکنون هیچ معادله دقیق و جامعی برای تخمین ابعاد پهنه جدایی تشکیل شده در سمت پایین‌دست تلماسه‌ها ارائه نشده است و پژوهش شریفی و همکاران (۲۵) با بهره‌گیری از داده‌های معتمدی، یکی از نوین‌ترین پژوهش‌های اخیر محسوب می‌شود.

از دیگر پژوهش‌های متمرکز روی برآورد ناحیه جدایی جریان، پژوهش لغبر و سسنروس (۱۶) است که با شبیه‌سازی بسترهایی با شیب‌های متنوع پایین‌دست، در سه محدوده کمتر از ۱۰ درجه، بین ۱۰-۱۷ و بیشتر از ۱۷ درجه، به بررسی ناحیه جدایی جریان پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد، ناحیه جدایی جریان در زاویه پایین‌دست کمتر از ۱۰ درجه، تشکیل نمی‌شود و محل جدایی جریان مدل‌سازی شده با Delft3D تحت تأثیر اندازه زاویه پایین‌دست، متغیر است.

استفاده از سرعت سنج PIV در ۱۲ آزمایش مختلف، با عبور جریان‌های خیلی عمیق، خیلی کم عمق، خیلی سریع و خیلی آهسته نشان داد، در الگوهای جریان، طول اتصال مجدد جریان به‌طور خطی با نسبت سرعت متوسط عمق جریان به سرعت برشی در تاج تلماسه مرتبط است. کیم و همکاران (۱۴) با انجام مدل‌سازی RANS با دو روش DES و VOF و با استفاده از روش حل عددی ضمنی ناپایدار در شرایط عدم لغزش دیواره‌ها و کف کانال، به بررسی عوامل آشفتگی جریان در سیال‌های چند لایه پرداختند و بزرگی ناحیه جدایی جریان و پارامتر آشفتگی را تخمین زدند. روش DES (روش شبیه‌سازی گردابه جدا شده) یک روش ترکیبی است که نتایج به نسبت خوبی را برای جدایی جریان ارائه می‌کند (۶). بادزن‌چین و همکاران (۵) به بررسی آزمایشگاهی اثر شکل بستر تلماسه با ارتفاع‌های مختلف، بر پارامتر تنش برشی بستر پرداختند و نتایج نشان داد، تنش برشی حاصله، رابطه مستقیمی با ابعاد تلماسه و میزان استغراق آن‌ها دارد. افزایش ارتفاع تلماسه‌ها سبب بیشتر شدن تنش برشی بستر شده و حتی میزان آن در جریان با شکل بستر، حدود ۱۵۰ درصد بیشتر از تنش برشی در بستر صاف گزارش شده است که این موضوع لزوم بررسی تأثیر شکل بستر بر ساختار جریان را ارائه می‌کند. از دیگر پژوهش‌های داخلی مشابه در این زمینه، پژوهش آزمایشگاهی حیدری و همکاران (۱۲) در بررسی تأثیر شکج‌ها به‌عنوان گونه‌ای دیگر از شکل بستر بر پارامتر تنش برشی است. در این پژوهش، با ساخت شکج‌های مصنوعی مثلثی شکل با شیب ملایم بالادست، شیب کوتاه و تند پایین‌دست، تنش برشی بستر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، با تغییر قطر ذرات مورد استفاده در ساخت شکج‌ها و یا تغییر شرایط هیدرولیکی جریان، مقدار تنش برشی بستر به صورت چشمگیری نسبت به بستر صاف تغییر کرده و اعمال تنش برشی ناشی از فرم بستر در معادلات بسیار ضروری است.

با تغییر سرعت جریان گذرنده از تلماسه‌ها، ساختار جریان نیز دچار تغییر می‌شود؛ بنابراین بررسی توزیع پروفیل

گراتس اتریش استفاده شده است. به این ترتیب مشخصات هندسی تلماسه بکار رفته در این پژوهش و دیگر پارامترهای مؤثر بر جدایی جریان، به عنوان پارامترهای مورد بررسی معرفی شده و شکل‌های مختلف آن‌ها برای تعیین مقدار تأثیر پارامترهای شکل هندسی و ساختار جریان بر ابعاد جدایی جریان تشریح می‌شود. در این پژوهش برای مدل‌سازی شرایط مختلف جریان عبوری از تلماسه‌های متوالی از نرم‌افزار SSIIM استفاده می‌شود. در شبیه‌سازی با نرم‌افزار SSIIM، می‌توان بستر را بصورت ثابت و یا متحرک مدل‌سازی کرد. آزمایش‌های معتمدی در فلوم مستطیلی به طول ۱۲ متر، عرض ۷۶ سانتی‌متر و عمق ۱۰۰ سانتی‌متر انجام گرفته‌اند. در شرایط آزمایشگاهی، به منظور ایجاد جریان کاملاً توسعه یافته در مقاطع اندازه‌گیری سرعت جریان و انجام آزمایش، در ابتدای فلوم یک حوضچه آرامش به طول ۲ متر ایجاد شد. شرایط آزمایشگاهی (۲۰) با همه جزئیات در برنامه SSIIM شبیه‌سازی شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود (۲۸). تلماسه مدل‌سازی شده دارای زاویه شیب پایین دست ۳۸ درجه و تاج تخت است که در شکل ۱، جزئیات آن ارائه شده است (۱۷ و ۲۰).

تعداد ۹ سری آزمایش شبیه‌سازی شد. آزمایش‌ها برای تلماسه تاج تخت نشان داده شده در شکل ۱، در دبی‌های مختلف (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ لیتر بر ثانیه) و یک عمق (۰/۲ متر) و شرایط تزریق رسوب ذرات با چگالی ۲۶۵۰ و ۵۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب مدل‌سازی شده است.

شبیه‌سازی تلماسه‌ها بر پایه داده‌های پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده معتمدی و همکاران (۱۵)، توسط دستگاه PIV صورت گرفته است. در پژوهش ایشان جریان عبوری از روی تلماسه‌های پلاستیکی شکل ۱ مورد ارزیابی قرار گرفته است و ناحیه جدایی جریان با دقت اندازه‌گیری شده است. در شکل ۲، PIV و تجهیزات بکار گرفته شده در پژوهش ایشان و تصویر گرفته شده از خروجی حاصل از تحلیل عکس نشان داده شده است. علت استفاده از پژوهش ایشان، فقط صحت سنجی مدل SSIIM و استخراج خروجی‌های قابل اطمینان است.

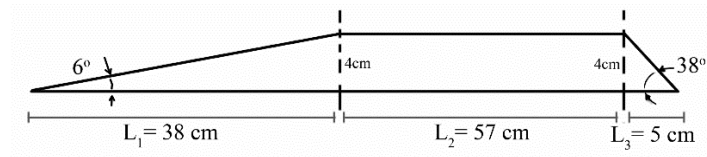
بر اساس منابع در دسترس و موجود، اغلب پژوهش‌ها روی جریان صاف انجام شده‌اند و تأثیر چگالی جریان عبوری از روی تلماسه‌ها مورد بحث قرار نگرفته است؛ بنابراین تاکنون تأثیر هندسه تلماسه، مورفولوژی و یا شرایط هیدرولیکی جریان در منابع متعددی مورد ارزیابی قرار گرفته است (۱، ۵ و ۱۲) و همچنان فقدان مطالعه متمرکز بر کیفیت جریان عبوری از روی تلماسه‌ها در شرایط آزمایشگاهی و یا مدل‌سازی دیده می‌شود؛ بنابراین این پژوهش به احتمال جزء معدود منابع در این زمینه است. هدف این پژوهش، بررسی شناخت پارامترهای مؤثر در جدایی جریان و ارزیابی ساختار جریان عبوری از شکل‌های مختلف بستر در جریان‌های حاوی رسوب و بدون رسوب است. برای دستیابی به این هدف، از شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار "SSIIM" استفاده می‌شود. مشخصه اصلی برنامه SSIIM نسبت به سایر برنامه‌های هیدرولیکی، قابلیت مدل کردن انتقال رسوب در بستر ثابت و متحرک است و مدل‌سازی رسوب با سایزهای مختلف بار بستر، بار معلق، شکل بستر و نیز تأثیر شیب بستر را در برمی‌گیرد.

پس از شبیه‌سازی تلماسه‌ها با نرم‌افزار SSIIM، به منظور ارزیابی صحت مدل و اندازه مناسب مش‌بندی، از داده‌های آزمایشگاهی انجام گرفته توسط معتمدی استفاده شده است (۱۷ و ۲۰). در نهایت شرایط جریان گذرنده از تلماسه با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌ها و هندسه تلماسه بکار رفته در پژوهش معتمدی مدل‌سازی شد. شرایط هیدرولیکی جریان شامل مقادیر مختلف دبی، عمق جریان، وضعیت بدون تزریق رسوب و با تزریق رسوب است که با استفاده از نرم‌افزار SSIIM مدل شده است و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده است.

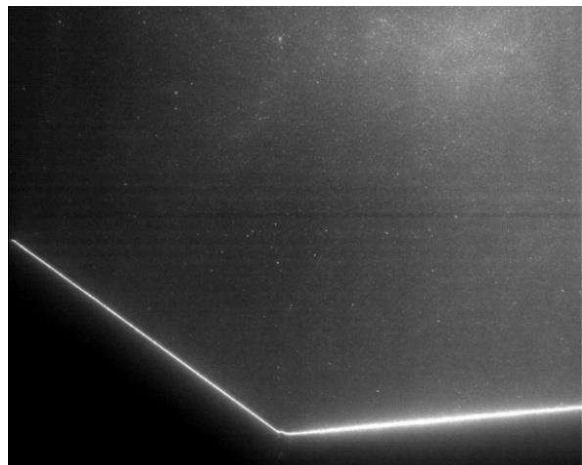
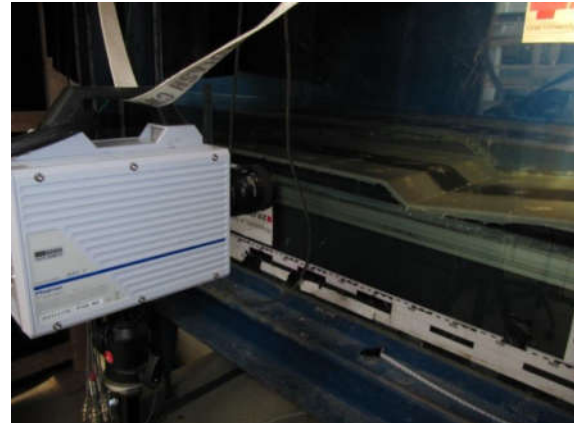
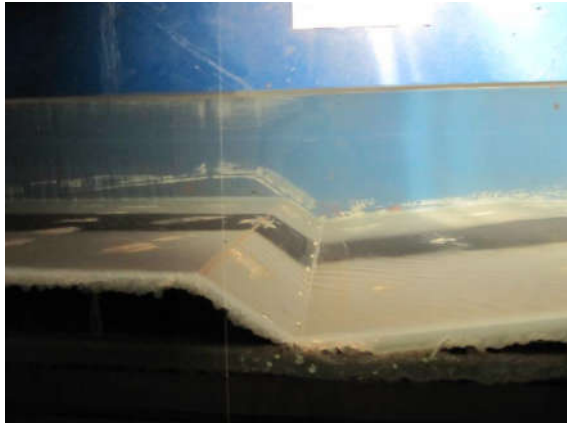
مواد و روش‌ها

شبیه‌سازی تلماسه‌ها

در این پژوهش برای شبیه‌سازی جریان عبوری از تلماسه‌های متوالی از شرایط آزمایشگاهی بکار رفته در پژوهش معتمدی و همکاران (۱۷ و ۲۰) در دانشکده هیدرولیک دانشگاه صنعتی



شکل ۱. تلماسه مدل‌سازی شده



شکل ۲. الف) دستگاه اندازه‌گیری سرعت PIV، ب) تلماسه، ج) تصویر گرفته شده از PIV و

د) خروجی حاصل از تحلیل عکس (۲۰)

انتخاب بهینه مش

شبیه‌سازی دقت بخشید. البته افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی، سبب افزایش زمان محاسبات شده و ممکن است انجام این‌گونه پژوهش‌ها مقرون به صرفه نباشد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در ابتدا، برای تعیین اندازه بهینه مش، مدل با شرایط آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده مقایسه شود. تعریف سلول‌های متراکم در ناحیه نزدیک بستر و بررسی نتایج خروجی با داده‌های آزمایشگاهی (۱۷ و ۱۸)، بهینه‌ترین مش را

یکی از مهم‌ترین مراحل در شبیه‌سازی عددی، انتخاب بهینه‌ترین اندازه مش است. با افزایش مش‌بندی درشت یا مش درشت، گرادیان متغیرها تغییر کرده است که در نتیجه ممکن است، خروجی‌های نامعتبری حاصل شود (۱۷ و ۱۸). از این رو می‌توان با تعریف یک مش‌بندی ظریف در ناحیه‌ای که متغیرهای جریان تحت تأثیر تغییرات ناگهانی هستند، به

لازم به ذکر است در پژوهش شریفی (۲۵)، دقت اندازه و شکل شش وجهی مش بندی در مدل شبیه سازی STAR-CCM+ بررسی شده و نتایج پژوهش اخیر نشان می دهد، برای شبیه سازی جریان عبوری از تلماسه ها می توان با انتخاب مش مناسب، جدایی جریان عبوری از تلماسه ها را با STAR-CCM+ نیز مدل سازی کرد. در پژوهش ایشان، مش مناسب ۵ میلی متر برآورد شده و نتایج حاصل از پژوهش ایشان و مقایسه با داده های آزمایشگاهی و خروجی مدل SSIIM (۱۷)، درصد خطای ۱۱/۹٪ را قابل قبول نشان می دهد.

نتایج و بحث

نتایج شبیه سازی تلماسه با عمق جریان ۲۰ سانتی متر، دبی متغیر بدون تزریق رسوب

تلماسه نشان داده شده در شکل ۱، با زاویه بالادست ۶ درجه، ارتفاع تاج تلماسه ۴ سانتی متر و زاویه پایین دست ۳۸ درجه برای عمق ۲۰ سانتی متر در دبی های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ لیتر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج جریان عبوری از تلماسه های مدل شده برای دبی کمینه، متوسط و بیشینه در شکل ۳ و برای سایر دبی ها در شکل ۴ ارائه شده است. تصاویر ارائه شده، پروفیل های سرعت جریان عبوری از روی تلماسه پنجم و ششم (نسبت به ابتدای کانال) است. باتوجه به پروفیل های سرعت جریان محور مرکزی تلماسه مشخص است، بزرگترین گودال جدایی جریان مربوط به دبی ۸۰ لیتر بر ثانیه بوده و با افزایش سرعت جریان، طول ناحیه جدایی جریان افزایش می یابد. براین اساس کوچکترین گودال جدایی جریان مربوط به دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه است. ناحیه جدایی جریان برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه تقریباً تا انتهای تلماسه پنجم ادامه داشته و در طول کمی از تلماسه ششم جدایی جریان دیده می شود، طول ناحیه برآوردی جدایی جریان برای دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه حدود ۵۵ میلی متر است. این در حالیست که در دبی ۸۰ لیتر بر ثانیه طول ناحیه جدایی جریان ۱۵۰ میلی متر برآورد شده است. از آنجایی که پروفیل های سرعت ارائه شده توسط معتمدی و همکاران با دستگاه PIV اندازه گیری شده (۱۷) و مدل براین اساس صحت سنجی

برآورد می کند؛ بنابراین خطوط تراز مش بندی در راستای عمق جریان و نزدیک به بستر متراکم تر و در فواصل نزدیک بهم بوده و با فاصله گرفتن از بستر تا نزدیکی تاج و سپس از تاج تا نزدیک شدن به سطح جریان آزاد، فواصل شبکه افزایش می یابد. در این پژوهش از بستر تا عمق ۵ سانتی متری، فواصل بین خطوط، حد فاصل تلماسه های متناوبی که در طول جریان مدل شده اند، ۱ میلی متر تعریف شده و پس از آن بسته به عمق جریان تا ۲۰ سانتی متر، فواصل بین خطوط بزرگتر تعیین می شوند. لازم به ذکر است که متراکم تعریف کردن مش و همگن بودن شبکه باعث افزایش زمان شبیه سازی شده و گاهی تا ۵۰ الی ۱۰۰ ساعت زمان را افزایش می دهد که این خود حاکی از آن است که در انتخاب فواصل بهینه مش باید نهایت دقت را کرد (۱۸ و ۲۵).

صحت سنجی مدل

نتایج حاصل از مدل عددی با مش بندی در نظر گرفته شده بیان می کند، طبق رابطه (۱)، تفاوت بین مقادیر پیش بینی شده حاصل از مدل (Y) و مقادیر اندازه گیری شده (X) پروفیل های سرعت در پژوهش ها (۱۷)، به طور متوسط کمتر از حدود ۱۰ درصد است که مطابقت مناسب نتایج پژوهش حاضر را با پژوهش پیشین نشان می دهد؛ بنابراین به مدل SSIIM با مش بهینه می توان اعتماد کرد و با شبیه سازی تزریق رسوب، پژوهش های مربوط به جدایی جریان عبوری از روی تلماسه ها در آب زلال و گل آلود را بررسی کرد.

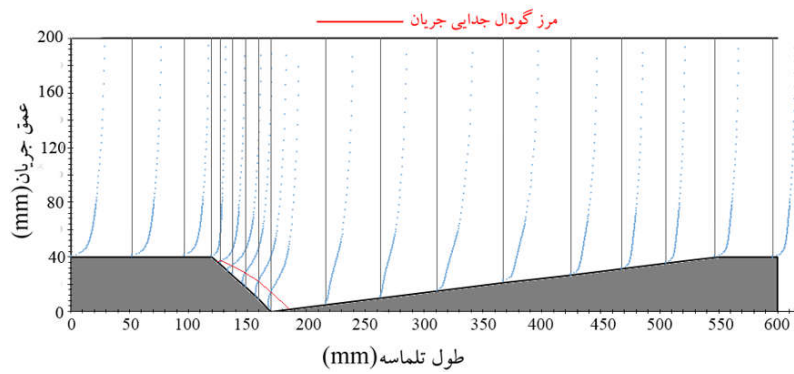
$$\% \text{ خطا} = \frac{\sum_{i=1}^n (X - Y)}{\sum_{i=1}^n (X)} \times 100 \quad (1)$$

تفاوت بین مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری شده از پروفیل های سرعت معتمدی و همکاران در جدول ۱ ارائه شده است. در مجموع حداقل و حداکثر اختلاف به ترتیب ۶/۴ و ۱۱/۲ درصد است در حالی که میانگین کمتر از ۱۰ درصد بوده است و تطابق مناسب، نشان دهنده کارایی برنامه SSIIM در پژوهش حاضر است.

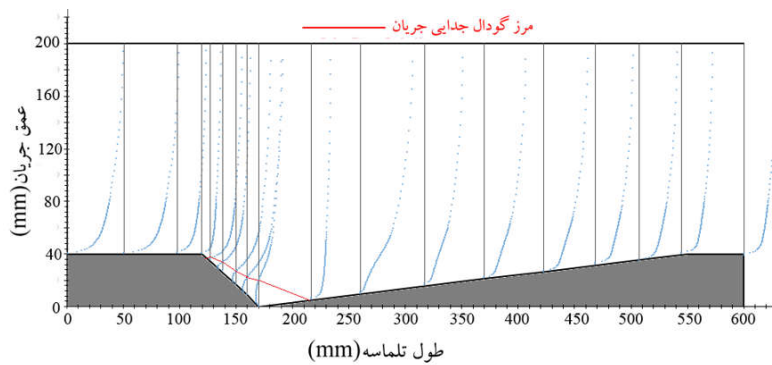
جدول ۱. اختلاف میانگین پروفیل های سرعت اندازه گیری شده و مدل شده

میانگین	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شماره پروفیل سرعت بین دو تلماسه متوالی
۹/۱۸	۶/۴	۷/۶	۱۰/۸	۹/۳	۱۱/۲	۱۰/۲	۹/۴	۹/۲	۸/۲	۹/۵	اختلاف میانگین سرعت مشاهده شده و مدل شده

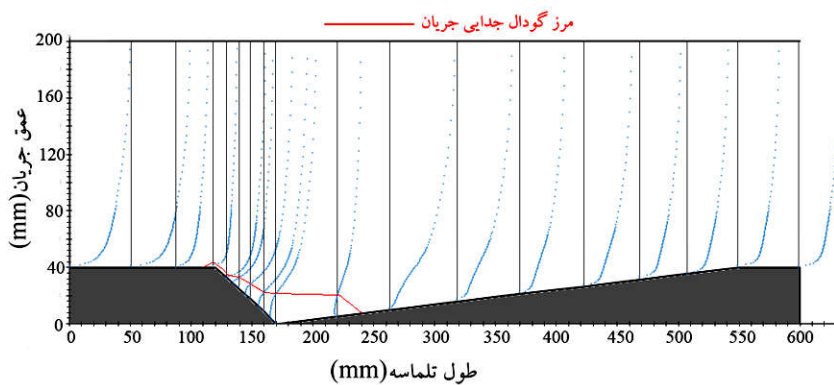
(الف)



(ب)



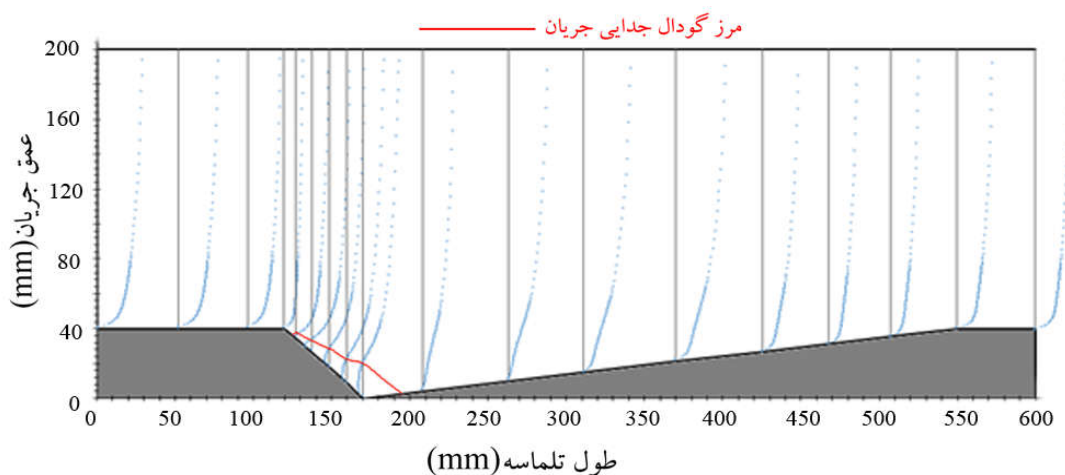
(ج)



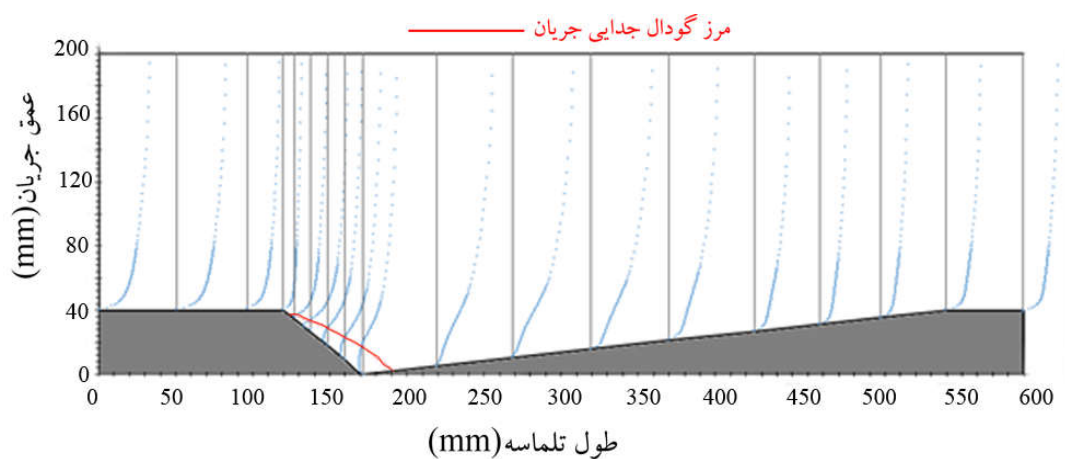
شکل ۳. پروفیل های سرعت جریان عبوری از تلماسه شبیه سازی شده با عمق ۲۰ cm؛ الف) دبی ۱۰ lit/s،

ب) دبی ۴۰ lit/s، ج) دبی ۸۰ lit/s

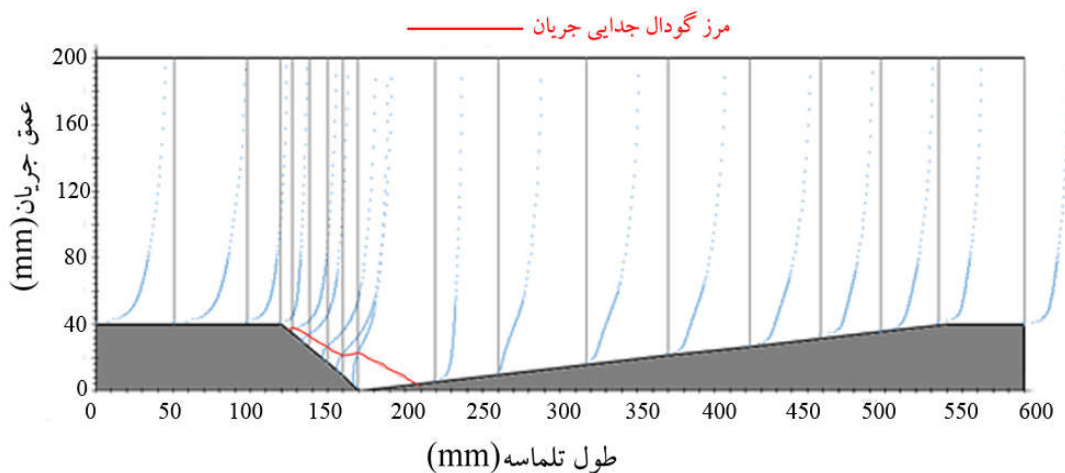
الف) ۱۵ lit/s



ب) ۲۰ lit/s



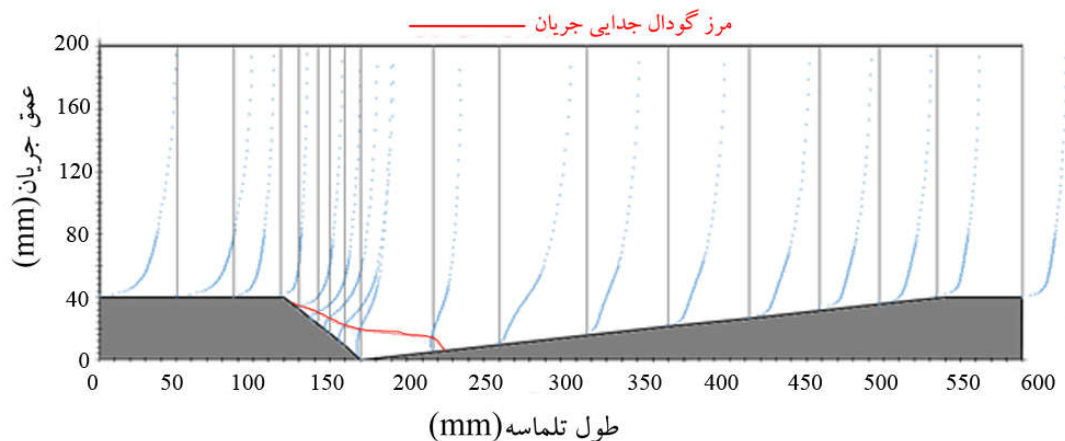
ج) ۳۰ lit/s



شکل ۴. پروفیل‌های سرعت جریان عبوری از تلماسه شبیه‌سازی شده با عمق جریان ۲۰ cm (الف) دبی ۱۵ lit/s،

(ب) دبی ۲۰ lit/s، (ج) دبی ۳۰ lit/s، (د) دبی ۶۰ lit/s

۶۰ lit/s (د)



شکل ۴. پروفیل‌های سرعت جریان عبوری از تلماسه شبیه‌سازی شده با عمق جریان ۲۰ cm دبی (الف) ۱۵ lit/s،

(ب) دبی ۲۰ lit/s، (ج) دبی ۳۰ lit/s، (د) دبی ۶۰ lit/s (ادامه)

پایین‌دست ۳۸ درجه بررسی می‌شود. باتوجه‌به پروفیل‌های سرعت ارائه شده در شکل ۶ مشخص است، تحت شرایط یکسان با تزریق رسوب در نزدیکی بستر، طول ناحیه جدایی جریان کاهش می‌یابد. براین اساس باتوجه‌به تزریق رسوب در عمق‌های نزدیک بستر و متعاقب آن افزایش اختلاط ذرات نزدیک بستر، کاهش سرعت جریان اتفاق افتاده است که در نتیجه آن، طول ناحیه جدایی جریان هم کاهش می‌یابد. به طوری که نتایج نشان می‌دهد، در حالت دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه، طول ناحیه جدایی جریان با تزریق رسوب (۹۰ میلی‌متر) نسبت به حالت بدون تزریق رسوب (۱۱۵ میلی‌متر)، ۲۱/۷ درصد کاهش یافته است. با افزایش چگالی رسوب تزریقی نیز ناحیه جدایی جریان به نسبت کمتر شده که خلاصه نتایج آن در جدول ۲، ارائه شده است. در جدول ۲، رسوب شماره‌گذاری شده با عدد ۱، دارای چگالی ۲۶۵۰ و رسوب ۲ دارای چگالی ۵۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.

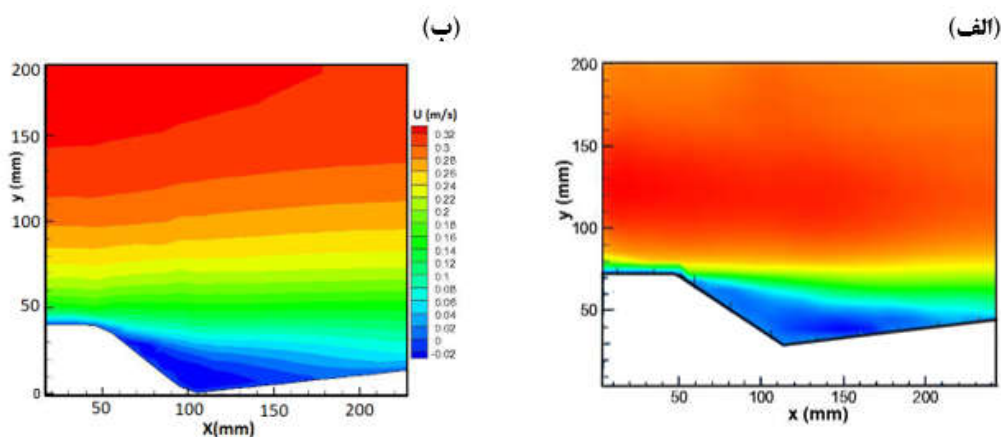
در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده، بررسی برهمکنش شکل بستر و هندسه آن بر ابعاد ناحیه جدایی جریان موردتوجه قرار گرفته است. در پژوهش‌های مختلف ابعاد ناحیه جدایی، تابع ساده‌ای از ارتفاع تلماسه در نظر گرفته شده بود که این موضوع در پژوهش‌های ونمیرلو و روتر (۳۰)، ۵ برابر ارتفاع تلماسه،

شده است؛ بنابراین می‌توان به داده‌های برآورد شده با مدل SSIIIM اعتماد کرد و تأثیر تغییرات ساختار جریان عبوری از روی تلماسه‌ها بر جدایی جریان را بررسی کرد.

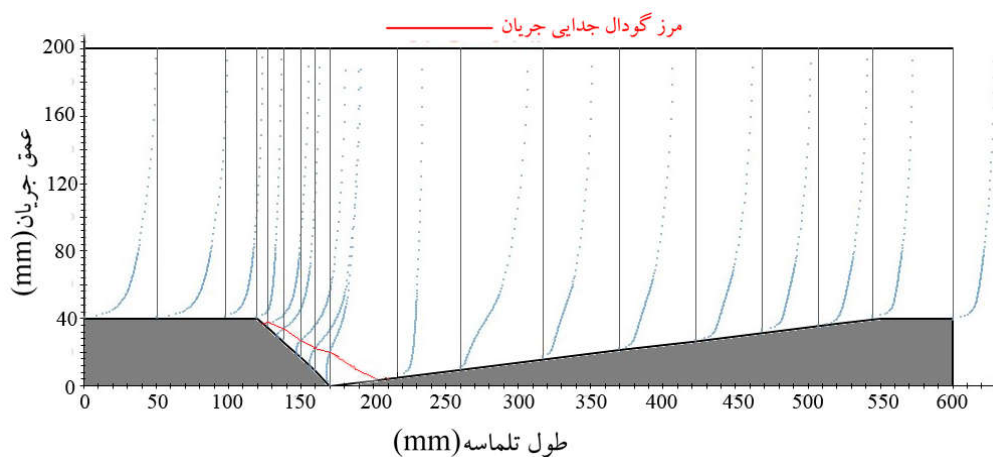
در شکل ۵، نتایج تحلیل پروفیل‌های اندازه‌گیری شده سرعت جریان با PIV برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و ناحیه جدایی جریان برآوردی با مدل SSIIIM نشان داده شده است. محدوده جدایی جریان در داده‌های اندازه‌گیری شده و یا مدل‌سازی شده با رنگ آبی (سرعت‌های بسیار ناچیز و نزدیک صفر) و مقادیر منفی نشان داده شده است. مقایسه ناحیه آبی رنگ در دو تصویر نشان می‌دهد، مدل SSIIIM با اندازه‌های مش متراکم (۱ میلی‌متر تا حد فاصل ۵ سانتی‌متری بستر) در نزدیکی بستر، به خوبی می‌تواند محدوده جدایی جریان را نشان دهد. دقت پروفیل‌های سرعت خروجی از مدل، در مقایسه با داده‌های سرعت اندازه‌گیری شده با قوی‌ترین تجهیزات لیزری، حاکی از توانمندی و دقت زیاد مدل SSIIIM در شبیه‌سازی جریان صاف و حاوی رسوب دارد.

نتایج شبیه‌سازی تلماسه با عمق جریان ۲۰ سانتی‌متر و دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه با تزریق رسوب

در این بخش جریان عبوری از روی تلماسه‌های مدل‌شده در حالت تزریق رسوب در محور مرکزی تلماسه با زاویه



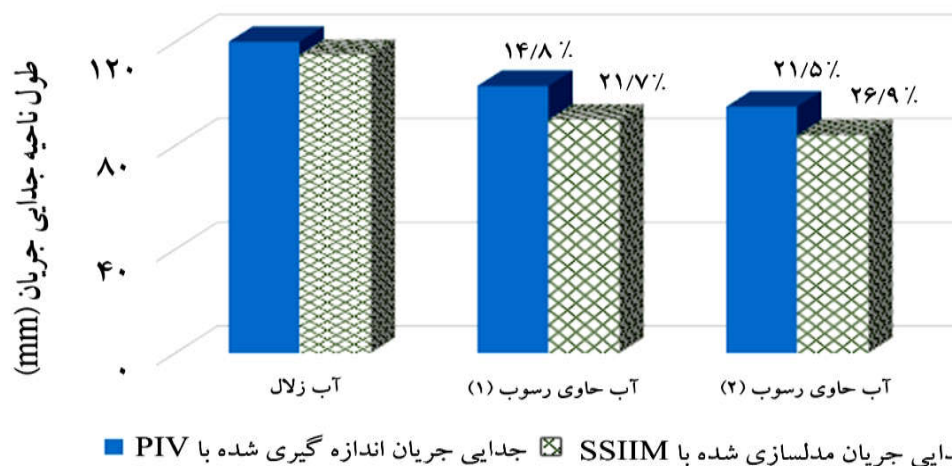
شکل (۵)، الف) توزیع سرعت‌های برداشت‌شده در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه با دستگاه PIV در مقایسه با (ب) سرعت مدل شده توسط SSIIM. در هر دو تصویر ناحیه جدایی جریان به رنگ آبی تیره نشان داده شده است.



شکل ۶. پروفیل‌های سرعت جریان عبوری حاوی رسوب ۱ از تلماسه شبیه‌سازی شده با عمق جریان ۲۰ cm و دبی ۳۰ lit/s

جدول ۲. ناحیه جدایی جریان اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در دبی‌های مختلف و در دو جریان زلال و حاوی رسوب

سری آزمایش	دبی (lit/s)	وضعیت جریان	عمق جریان (cm)	طول ناحیه جدایی جریان اندازه‌گیری شده (mm)	طول ناحیه جدایی جریان مدل‌سازی شده (mm)
۱	۱۰			—	۵۵
۲	۱۵			—	۵۷
۳	۲۰			—	۶۱
۴	۳۰	بدون رسوب	۲۰	۱۲۱	۱۱۵
۵	۴۰			—	۱۲۲
۶	۶۰			۱۵۵	۱۴۵
۷	۸۰			—	۱۵۰
۸	۳۰	تزریق رسوب ۱	۲۰	۱۰۳	۹۰
۹	۳۰	تزریق رسوب ۲	۲۰	۹۵	۸۴



شکل ۷. درصد کاهش ناحیه جدایی جریان عبوری از روی تلماسه، پس از تزریق رسوب (مقادیر مدل‌سازی شده و اندازه‌گیری شده)

از تلماسه‌ها، پروفیل‌های سرعت جریان عبوری از روی تلماسه تاج تخت، به‌نوعی است که سبب کاهش ناحیه جدایی جریان عبوری از روی تلماسه‌ها با تاج تیز می‌شود. در خصوص تزریق رسوب و تأثیر آن بر ابعاد ناحیه جدایی جریان، متأسفانه پژوهش‌های چندانی در دسترس نیست تا نتایج حاصل از مدل‌سازی حاضر با رویکردهای سایر پژوهشگران بررسی شود. از پژوهش‌های رسوبی در این زمینه، پژوهش لاتوسینزکی (۱۵) است که تأثیر رسوب تزریقی را بر هندسه تلماسه ارزیابی کرده است، ولی به ابعاد ناحیه جدایی جریان اشاره نشده است؛ بنابراین به‌احتمال تنها داده‌های موجود در این راستا، ابعاد ناحیه جدایی جریان اندازه‌گیری شده با PIV (۲۰) بوده است که در این پژوهش نشان داده شد، تزریق رسوب با تغییرات پروفیل‌های سرعت و تغییر گرادیان فشار نامطلوب باعث تغییر ناحیه جدایی جریان شده و تزریق ذرات رسوبی با چگالی بیشتر، از سرعت سیال عبوری کاسته و در نهایت ناحیه جدایی کوچکتری را شامل می‌شود. این تغییرات در شکل ۷ ارائه شده است و نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد، با تزریق رسوب ۱، ناحیه جدایی جریان به میزان ۲۱/۷٪ و با تزریق رسوب ۲ که چگالی بیشتری دارد، ابعاد حفره جدایی به میزان ۲۶/۹٪ نسبت به آب زلال کمتر شده است.

اوجها و مزومدار (۲۳)، ۵/۸ برابر ارتفاع تلماسه و نصیری و همکاران (۲۱)، ۳/۵ الی ۴/۵ برابر ارتفاع تلماسه گزارش شده‌اند. بعدها در پژوهش معتمدی و همکاران (۱۷ و ۲۰) نشان داده شد، در ارتفاع‌های یکسانی از تلماسه‌ها با دو زاویه وجه پایین دست متفاوت (۳۸ درجه و ۸ درجه) در شرایط یکسان هیدرولیکی، ناحیه جدایی جریان یکسانی اتفاق نمی‌افتد. این موضوع در پژوهش شریفی (۲۵)، با جزئیات بیشتری بررسی شد و زاویه وجه پایین دست به‌عنوان یک عامل کلیدی در برآورد اندازه ناحیه جدایی جریان معرفی شد. در پژوهش لوفبور و همکاران (۱۶) نیز، زاویه وجه پایین دست در مدل‌سازی و مورفولوژی رودخانه‌های واقعی بررسی شد که نتایج آن، تأثیر زوایای بیش از ۱۷ درجه را در ایجاد ناحیه جدایی جریان ارائه می‌کند. در پژوهش معتمدی و همکاران (۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰)، شرایط هیدرولیکی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد، با افزایش سرعت جریان، ناحیه جدایی بزرگتر شده است. اگرچه در برآورد ناحیه جدایی جریان، شکل تاج تلماسه (تخت و یا تیز) بسیار مهم است؛ زیرا در شرایط یکسانی از سرعت جریان عبوری از روی تلماسه‌ها، در زاویه یکسانی از وجه پایین دست و ارتفاع کاملاً یکسانی

جمع بندی و نتیجه گیری

استفاده از شبیه سازی های کامپیوتری برای مدل سازی و مطالعه جریان ها، می تواند سبب صرفه جویی در هزینه و زمان شود. در این پژوهش، برای شبیه سازی هندسه تلماسه ها از مدل عددی SSIIM استفاده شد. سپس نتایج تجربی حاصل از پژوهش معتمدی و همکاران (۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰) که در آن برای اندازه گیری پروفیل سرعت از دستگاه PIV استفاده شده بود، برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. مقایسه پروفیل های سرعت مدل و مشاهده ای، میانگین اختلاف حدود ۹٪ را نشان دادند که نشان دهنده دقت مناسب مدل در برآورد ناحیه جدایی جریان عبوری از تلماسه هاست.

نتایج نشان می دهد، طول ناحیه برآوردی جدایی جریان برای دبی های بزرگتر و سرعت جریان بیشتر، بلندتر بوده است، به صورتی که در جریان صاف و زلال، ناحیه برآوردی جریان در دبی ۱۰ لیتر بر ثانیه، حدود ۵۵ میلی متر و در دبی ۸۰ لیتر بر ثانیه، حدود ۱۵۰ میلی متر برآورد شده است. با افزایش رسوب، طول ناحیه جدایی جریان کمتر شده است و مقایسه داده های مدل و مقادیر اندازه گیری شده در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه، کاهش ۲۱/۷ درصدی طول ناحیه جدایی جریان از ۱۱۵ میلی متر به ۹۰ میلی متر را پس

از تزریق رسوب شبیه سازی می کند. با افزایش غلظت رسوب تزریقی، ناحیه جدایی مدل سازی شده کوچکتر می شود و کاهش ۲۶/۹٪ را نسبت به جریان زلال و بدون رسوب نشان می دهد.

پژوهش حاضر، با هدف معرفی و ارائه نقاط قوت برنامه SSIIM در تحلیل جریان عبوری از روی تلماسه ها در شرایط آب زلال و حاوی رسوب در نظر گرفته شده است و پیشنهاد می شود، پژوهش های بیشتری در زمینه بررسی ساختار جریان مدل سازی شده از روی تلماسه های ثابت و متحرک با متمرکز شدن بر نوع رسوب تزریقی و محل تزریق رسوب در کانال توسعه یابد.

سپاسگزاری

نویسنده مسئول این پژوهش بر خود لازم می داند، از همکاری علمی جناب آقای دکتر افضلی مهر، عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت و همچنین حمایت های مالی جناب آقای پروفیسور Zenz، ریاست محترم دانشکده هیدرولیک و مدیریت منابع آب دانشگاه صنعتی Graz - اتریش به دلیل فراهم کردن شرایط آزمایشگاهی طی سال های ۲۰۱۱-۲۰۱۳ تقدیر و تشکر نماید.

منابع مورد استفاده

1. Afzalimehr, H., V. P. Singh and E. Fazel Najafabadi. 2010. Determination of form friction factor. *Journal of Hydrologic Engineering* 15(3): 237-243.
2. Ahmad, N., S. Bahry, Z. Ali, A. Daud nad S. Musa. Effect of flow resistance in open rectangular channel. In: Proceeding of 2017 MATEC Web of Conferences. Ho Chi Minh, Vietnam.
3. Ashley G. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms; a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Research*. 60(1): 160-172.
4. Attar, S. and S.S. Li. Numerical investigation of flow structure and shear stress over fixed dunes. In: Proceeding of 2012 International Conference on Fluvial Hydraulics River Flow, San José, Costa Rica.
5. Badzanchin, M., M. Bahrami Yarahmadi and M Shafai Bejestan. 2023. Experimental Study of Bed Shear Stress in Straight Channels Covered with Dunes of Different Sizes. *Journal of Water and Soil Science* . 27 (1) :203-215 (In Farsi).
6. Bunge, U., C. Mockett, F. Thiele. 2007. Guidelines for implementing detached-eddy simulation using different models. *Aerospace Science and Technology*. 11(5): 376-385.
7. Caamaño, D., P. Goodwin, JM. Buffington. 2012. Flow structure through pool-riffle sequences and a conceptual model for their sustainability in gravel-bed rivers. *River Research and Applications* 28(3): 377-389.
8. Dey, S., P. Paul, H. Fang and E. Padhi. 2020. Hydrodynamics of flow over two-dimensional dunes. *Physics of Fluids* 32(2):025106.

9. Fenton, JD. 2010. Calculating resistance to flow in open channels. *Alternative Hydraulics*, 1-7.
10. Gomez, B., RL. Naff, DW. Hubbell. 1989. Temporal variations in bedload transport rates associated with the migration of bedforms. *Earth Surface Processes and Landforms* 14(2): 135-156.
11. Heydari, H., AR. Zarrati and M. Karimae Tabarestani. 2014. Bed form characteristics in a live bed alluvial channel. *Scientia Iranica* 21(6): 1773-1780.
12. Heydari, M., M. Bahrami Yarahmadi and M. 2022. Shafai Bejestan. Experimental Study of the Effect of Ripple Bedforms with Fine and Coarse Sediments on Bed Shear Stress. *Journal of Water and Soil Science* 26 (2) :283-297 (In Farsi).
13. Karamisheva, R.D., J.F. Lyness, W. R. C. Myers, J. O'Sullivan and J. B. C. Cassells. Prediction of bed form height in straight and meandering compound channels. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 80. In: Proceedings of 2005 the 3rd International Conference on Water Resources Management, Algarve, Portugal.
14. Kim, BR., DY. Sohn, YH. Choi and YH. Lee. 2020. A study on flow characteristics and flow uniformity for the efficient design of a flow frame in a redox flow battery. *Applied Sciences* 31;10(3):929.
15. Latosinski, F. G., M. L. Amsler, C. A. Vionnet, A. I. Heredia Ligorria, R. N. Szupiany, J. M. Diaz Lozada, C. M. García and M. H. García. 2022. The role of dunes in flow resistance in a large and a small river. The case of the Paraná and Tercero rivers, Argentina. *Journal of Hydraulic Research* 60(3): 389-407.
16. Lefebvre, A. and J. Cisneros. 2023. The influence of dune lee side shape on time-averaged velocities and turbulence. *Earth Surface Dynamics* 11: 575-591.
17. Motamedi, A., H. Afzalimehr, VP. Singh and L. 2014. Dufresne. Experimental study on the influence of dune dimensions on flow separation. *Journal of Hydrologic Engineering* 19(1): 78-86.
18. Motamedi, A., H. Afzalimehr, G. Zenz, M. Galoie and A. Motamedi. 2014. Rans simulations of flow over dunes with low lee and sharp lee angles. *Advances in Hydroinformatics: SIMHYDRO 2012-New Frontiers of Simulation*, 525-533.
19. Motamedi, A. and M. Galoie. Experimental measurement and numerical model of dunes drag coefficients. *Journal of Water and Soil Science*. 22(2): 29-39.
20. Motamedi, A. 2012. The Interaction of Gravel Dune Dimensions on Flow Structure, Boundary Layer and Separation Zone. Ph.D. Thesis, Department of Water Engineering. Isfahan University of Technology, Isfahan, I.R. Iran.
21. Nasiri Dehsorkhi, E., H. Afzalimehr and V. P. Singh. 2011. Effect of bed forms and vegetated banks on velocity distributions and turbulent flow structure. *Journal of Hydrologic Engineering* 16(6): 495-507.
22. Nelson JM, AR. Burman, Y. Shimizu, SR. McLean, RL. 2006. Shreve and M. Schmeeckle. Computing flow and sediment transport over bedforms. *In 4th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM 2005*, 861-872.
23. Ojha S. P. and B. S. Mazumder. 2008. Turbulence characteristics of flow region over a series of 2-D dune shaped structures. *Advances in Water Resources* 31: 561-576.
24. Peyret AP. 2011. Morphodynamics and geometry of channels, turbidites, and bedforms. The University of Texas at Austin. USA.
25. Sharifi, M., M. R. Tabatabai, S. H. Najafabadi. 2023. Numerical simulation of flow structures over dunes to develop an empirical relationship for separation zone dimensions. *Flow Measurement and Instrumentation* 1(89):102275.
26. Shen, X., R. Li, H. Cai. J. Feng and H. Wan. 2022. Characteristics of secondary flow and separation zone with different junction angle and flow ratio at river confluences. *Journal of Hydrology*, 614. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128537>.
27. Simons DB, E. V. Richardson. Forms of bed roughness in alluvial channels. *Journal of the Hydraulics Division*, 87(3):87-105.
28. Taghizadeh, M. R. Numerical Simulation of Flow Separation Zone on Fixed Dunes for Clear and Turbidity Flow. Master Thesis. Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, I.R. Iran.
29. T Chow, V. 1981. Open Channel Hydraulics, Mc Graw – Hill Limited, London.
30. Van Mierlo, M. C. L. M. and J. C. C. de Ruiter. 1988. Turbulence measurements above artificial dunes. Delft Hydraulics Laboratory, Delft, Netherlands.
31. Venditti J. G. 2013. 9.10 bedforms in sand-bedded rivers. 9:137-162.

Numerical Modeling of the Flow Separation Zone over Dunes under the Impact of Sediment Injection

M. R. Taghizadeh¹, A. Motamedi^{2*}, M. Galoie¹ and F. Kilanehei¹

(Received: June 9-2023 ; Accepted: October 17-2023)

Abstract

Understanding flow behavior over bedforms is one of the most complex topics in sedimentary engineering. Despite numerous studies that have been conducted on river beds, the understanding of the interaction between flow and bed in turbid and clear waters is still impoverished. The present study mainly focused on simulating clear and turbid flows using SSIIM software. This study modeled the flow through a 12-meter channel with nine consecutive dunes of 1-meter length and 4 cm height. Nine simulations were performed to investigate the effects of flow velocity and flow separation zone in clear and turbid water. Finally, the results were compared with the experimental results of previous researchers using the PIV. The modeling results showed that the length of the flow separation zone increases with increasing velocity, and the highest probability of flow separation occurs at the highest velocity. In turbid flow, flow separation is less than the same flow condition in clear flow, and as fluid density increases, the length of the flow separation zone decreases. This study demonstrates the acceptable functionality of the SSIIM software and its accuracy in estimating flow behavior with and without sediment.

Keywords: SSIIM software, Flow separation zone, Dune, Flow with sediment

1. Civil Engineering Department, Faculty of Technical and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2. Civil Engineering Department, Buein Zahra Technical University, Qazvin, Iran

*: Corresponding author, Email: artemis.mot@bzte.ac.ir