

بررسی برهمکنش هندسه تلماسه بر ساختار جریان و طول ناحیه جدایی با استفاده از دستگاه‌های سرعت سنج PIV و ADV

آرتمیس معتمدی^{*۱} - حسین افضل‌ی مهر^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۵/۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۰

چکیده

در این تحقیق ساختار جریان بر روی تلماسه‌های شنی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در یک فلوم ۱۲ متری مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه فنی گراتس اتریش، بر روی ۴ نوع تلماسه دو بعدی به طول موج ۱ متر و عرض فلوم مورد استفاده، زاویه وجه پایین‌دست ۸ و ۳۸ درجه و ارتفاع‌های ۴، ۶ و ۸ سانتی‌متر تشکیل شده از ذرات ۱۳/۲ و ۵/۸ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفتند. اندازه‌گیری داده‌های سرعت و آشفتگی جریان توسط دستگاه ADV با فرکانس ۲۰۰ Hz و PIV انجام شده و در نهایت نتایج حاصل از پروفیل‌های برداشتی با نرم‌افزار هیدرولیکی سیم مقایسه و تحلیل شدند. نتایج ۲۸ سری آزمایش انجام شده در شرایط گوناگون هیدرولیکی شامل دو دبی جریان (۳۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه) و دو عمق متفاوت جریان (۳۱/۷ و ۱۹/۵ سانتی‌متر) نشان می‌دهد که افزایش پارامترهایی نظیر ارتفاع تلماسه، سرعت جریان، قطر ذرات تلماسه و کاهش عمق جریان سبب افزایش طول ناحیه جدایی جریان می‌شود، هرچند برای زاویه وجه پایین دست ۸ درجه پدیده جدایی جریان قابل مشاهده نیست. بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهند که در برخی شرایط هیدرولیکی در تلماسه نوع ۴ (ارتفاع ۴ سانتی‌متر و زاویه ۳۸ درجه)، ADV قادر به اندازه‌گیری سرعت‌های منفی در محل اتصال دو تلماسه نیست، هرچند PIV و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی توسط مدل سیم، ناحیه جدایی جریان را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ابعاد تلماسه شنی، ساختار جریان، ناحیه جدایی، مدل هیدرولیکی سیم، PIV

مقدمه

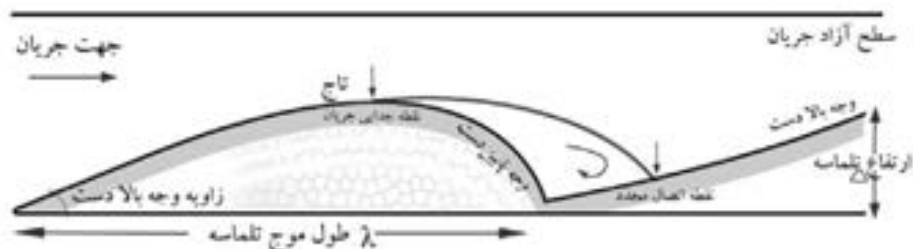
در رودخانه می‌باشند. نوع شکل بستر اصولاً به اندازه قطر ذرات رسوب بستگی دارد و این شکل‌ها با استفاده از مفاهیم هیدرودینامیکی تحت شرایط مشخصی از جریان طبقه‌بندی می‌شوند (۱۱). همزمان با شروع حرکت ذرات بستر در رودخانه‌ها، شکل‌های مختلف بستر تشکیل می‌شوند. از رایج‌ترین شکل‌های بستر در رودخانه‌های آب‌رفتی، بسترهای متحرک پوشیده از شکنج‌ها^۳ و تلماسه‌ها^۴ است (۷). ارتفاع تلماسه‌ها از مقادیر چند سانتی‌متر تا چند متر و طول موجشان از ۰/۵ متر تا چند هزار متر گزارش شده است (۷، ۸، ۹ و ۱۰). طبق آزمایش‌های متعدد ابعاد تلماسه‌ها به مشخصات جریان در رودخانه وابسته می‌باشند. تلماسه‌ها که در این پژوهش مورد بررسی و آزمایش قرار می‌گیرند، شامل اشکال بستری هستند که مقطع آنها با پروفیل سطح آب ناهمگام می‌باشد و از ذرات بسیار ریز و درشت ماسه (۴) تا ذرات درشت شن (۹) تشکیل می‌گردند.

یکی از اهداف مهندسی رودخانه، برنامه‌ریزی، طراحی و ساخت سازه‌هایی در مسیر رودخانه به منظور بهینه‌سازی در کاربرد و توسعه منابع آب است. از جمله مباحث مهم در مهندسی رودخانه، شناخت شکل رودخانه و تغییرات بستر آن‌هاست که در قالب علم مرفولوژی رودخانه بررسی می‌شود. در سال‌های اخیر مطالعه شکل‌های بستر در رودخانه‌های شنی و برهم‌کنش آنها با ساختار جریان و اثر آنها بر زیستگاه‌های طبیعی آبیان مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است.

رودخانه‌ها همواره به صورت‌های مختلف با شکل‌های بستر همراه هستند. این شکل‌های بستر تابعی از زمین‌شناسی منطقه، مشخصات رسوبات حمل‌شده از بالادست، دبی عبوری و نیروهای هیدرودینامیک

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان و کارشناس ارشد طرح تاسیسات آبی، شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان (Email: Artemis.mot@gmail.com)؛ نویسنده مسئول؛

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان



شکل ۱- شمایی از نمای طولی تلماسه و معرفی اجزاء آن

پایین دست تاج رخ می‌دهند. همچنین تنش برشی بستر، بیشینه مقدار خود را روی وجه بالادست تلماسه داشته و سپس کمینه مقدار خود را روی تاج تلماسه دارا است. طول ناحیه جدایی جریان نیز برای شیب ۳۵ درجه بیشتر از شیب ۲۸ درجه می‌باشد.

دورپناه (۱) نیز به منظور مقایسه جریان عبوری از روی تلماسه‌های تاج مسطح و تاج تیز، با ساخت تلماسه‌های مشابه با کار عطار (۲) و نصیری و همکاران (۱۵)، آزمایش‌هایی بر روی تلماسه‌هایی با ارتفاع ۰/۴ متر و زاویه ایستایی ۲۸ درجه با بکارگیری *ADV* انجام داد. نتایج کار وی نشان می‌دهد که ارتفاع ۴ سانتیمتری در تلماسه‌های با تاج مسطح بر روی جریان تأثیر گذار نبوده و ناحیه جدایی جریان قابل مشاهده نیست، بنابراین شکل تاج (تخت یا تیز) عامل مهمی در مشاهده یا عدم مشاهده ناحیه جدایی جریان محسوب می‌شود.

در پژوهش حاضر با شبیه‌سازی ابعاد مختلف از تلماسه‌های تاج مسطح و تیز گوش، با زوایای پایین دست کوچک و بزرگ و ارتفاع‌های متغیر، به بررسی عوامل موثر بر طول ناحیه جدایی جریان پرداخته می‌شود. هدف از این تحقیق، بررسی شناخت پارامترهای موثر در جدایی جریان در شکل‌های بستر مختلف می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، از سرعت‌سنج‌های *ADV* و *PIV* و آزمایش بر روی تلماسه‌ها با ابعاد مختلف و مقایسه نتایج با شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار "سیم" استفاده می‌گردد. همچنین مقایسه طول ناحیه جدایی برای شرایط مختلف هیدرولیکی و هندسی شکل بستر در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرند.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی تلماسه‌ها

در این پژوهش با ساخت ۹ تلماسه مصنوعی به صورت متناوب در طول یک کانال آزمایشگاهی با مقطع مستطیلی به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۷۵ متر و ارتفاع ۰/۹ متر مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه فنی گراتس در اتریش^۴، ۳۲ سری آزمایش متفاوت بر روی

اشلی (۵) برای نخستین بار به طبقه‌بندی تلماسه‌ها پرداخت. وی آنها را بر اساس سرعت جریان به دو شکل تلماسه‌های دوبعدی^۱ (برای مقادیر کم سرعت جریان) و تلماسه‌های سه‌بعدی^۲ (برای مقادیر زیاد سرعت جریان و با همان اندازه ذرات) تقسیم نمود. طبق نظرات مک‌لین (۱۴) تلماسه‌ها اغلب به صورت سه‌بعدی و با ارتفاعی حدود یک پنجم عمق جریان شکل می‌گیرند. این شکل‌ها معمولاً بسیار نامتقارن بوده و شیب بالادست آنها حدود ۲ تا ۶ درجه و شیب پایین دست، دارای زاویه ایستایی حدود ۳۰ درجه می‌باشد. در شکل ۱، شمایی کلی از یک تلماسه به تصویر کشیده شده است.

کاستاچوک و ویلارد (۱۲) با مطالعه در رودخانه‌ای بیان کردند که هیچ دلیلی بر وجود جدایی دائمی جریان در تلماسه‌های با زاویه پایین دست ۱۸ در دسترس نیست. بست و کاستاچوک (۸) نیز، با بررسی ساختار جریان آشفته در همان رودخانه نشان دادند که مورفولوژی تلماسه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر جریان داشته و ناحیه جدایی قابل مشاهده نیست.

با وجود چندین دهه مطالعات تحلیلی، آزمایشگاهی و رودخانه‌ای در مورد شکل‌های بستر از جمله تلماسه‌ها، هنوز اطلاعات کاملی در مورد تأثیر متقابل این شکل‌ها بر جریان، هندسه شکل بستر (تاج مسطح^۳ و تاج تیز)، اندازه ذرات تشکیل دهنده آنها در دسترس نیست. همچنین تأثیر تلماسه بر پارامترهای هیدرولیکی، طول ناحیه جدایی و مولفه‌های جریان آشفته بصورت مقایسه‌ای توسط دستگاه‌های *ADV* و *PIV* ارائه نشده است.

نصیری و همکاران (۱۵)، با هدف بررسی ساختار جریان بر روی تلماسه‌های شنی، تلماسه‌هایی با طول موج ۰/۹۶ متر، ارتفاع ۰/۰۸ متر و عرض ۰/۴ متر با ذرات شن ۱۰ میلی‌متری، شبیه‌سازی نمودند. آنها برای بررسی تأثیر تغییر شیب وجه پایین دست تلماسه بر روی جریان، دو زاویه ۲۸ و ۳۵ درجه انتخاب کردند. نتایج حاصل از آنالیز سرعت‌های برداشت شده با *ADV* نشان داد که با وقوع جدایی جریان در تاج تلماسه، خطوط جریان به سمت بستر کشیده می‌شوند و سرعت‌های افقی در جهت اصلی جریان با جهت معکوس بلافاصله در

4- Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Graz University of Technology, Austria.

1- Two-Dimensional(2-D)
2- Three-Dimensional(3-D)
3- Flat crested dunes

تلماسه‌های مورد نظر در ۴ اندازه متفاوت مطابق شکل ۲، ساخته شده و در طول کانال نصب شدند.

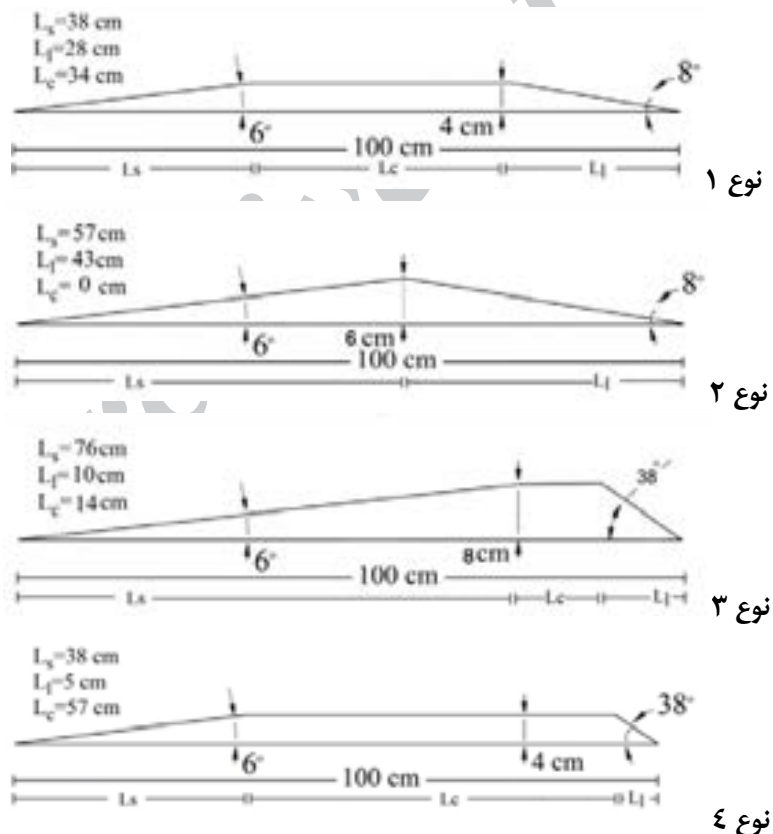
در تلماسه نوع ۱، طول موج ۱ متر، ارتفاع ۰/۰۴ متر، زاویه ایستایی ۸ درجه می‌باشد و این در حالی است که برای انجام آزمایش‌های مشابه بر روی تلماسه‌های تاج تیز در تلماسه نوع دوم با افزایش ارتفاع به میزان ۲ سانتی‌متر، شرایط مطلوب انجام می‌شود. در تلماسه نوع ۳، زاویه وجه بالادست افزایش یافته تا تاثیر افزایش زاویه بر روی نقطه جدایی جریان، طول ناحیه جدایی و محل نقطه اتصال مجدد مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. با کاهش ارتفاع به میزان ۵۰ درصد در تلماسه نوع ۳، تاثیر افزایش تاج طول تاج مسطح (نوع ۴) بر تغییر ساختار جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تلماسه‌هایی با ابعاد و زوایای مختلف صورت گرفت. شن مورد استفاده برای ساختن تلماسه‌ها دارای قطر میانه (d_{50}) حدود ۱۳/۲ و ۵/۸ میلی‌متر بود که در این پژوهش، آن‌ها به ترتیب به عنوان تلماسه‌های "درشت بافت" و "ریزبافت" نامیده شدند.

جدول ۱ خلاصه نتایج حاصل از آنالیز منحنی دانه‌بندی را برای تلماسه‌های "درشت بافت" و "ریزبافت" نشان می‌دهد. d_g متوسط اندازه ذرات و d_{50} ، d_{84} و d_{16} به ترتیب قطری از ذره شن هستند که در منحنی دانه‌بندی تلماسه‌ها به ترتیب، ۸۴، ۵۰ و ۱۶ درصد ذرات از آن کوچکتر می‌باشند. در صورت یکنواخت بودن ذرات شن، مقدار پارامترهای انحراف معیار هندسی، $\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$ و ضریب دانه بندی، G_r ، به مقدار واحد نزدیک می‌شوند.

جدول ۱- مشخصات ذرات شن مورد استفاده در ساخت تلماسه‌ها

نوع تلماسه	d_g (mm)	G_r	σ_g	d_{84} (mm)	d_{50} (mm)	d_{16} (mm)
درشت بافت	۱۲/۳۷	۱/۳۹	۱/۳۹	۱۷/۲	۱۳/۲	۸/۹
ریز بافت	۵/۲۹	۱/۴۷	۱/۴۷	۷/۸	۵/۸	۳/۶



شکل ۲- انواع تلماسه‌های ساخته شده در آزمایشگاه

۳، افزایش دقت کار با دستگاه را در دو حالت بستر رنگ آمیزی شده و نشده نشان می‌دهد.

مدل شبیه‌سازی شده تلماسه‌ها

یکی از مدل‌هایی که برای اهداف خاص در مطالعات مهندسی رودخانه، هیدرولیک، مهندسی محیط زیست و انتقال رسوب توسعه یافته است، مدلی به نام "سیم ۱-۱/۱" می‌باشد. هدف اصلی از توسعه این برنامه، شبیه‌سازی حرکت انتقال رسوب در رودخانه‌ها و کانال‌های آبیاری است. اگرچه بعدها کاربرد آن در محاسبه افت انرژی در تونل‌ها، شبیه‌سازی جریان عبوری از سرریزها و جریان لرح توسعه یافت ولی هنوز هم از بهترین و موثرترین کارایی آن می‌توان مدل سازی حرکت رسوب در بستر متحرک را نام برد (۱۷).

برنامه سیم با حل معادله ناپیر-استوکس و مدل $k-\epsilon$ ، جریان را در سه راستای x ، y و z شبیه‌سازی می‌کند و جریان عبوری از مش غیر ارتوگونال به روش حجم کنترل حل می‌شود.

مشخصه اصلی سیم، نسبت به سایر برنامه‌های هیدرولیکی، قابلیت مدل کردن انتقال رسوب در بستر متحرک و هندسه پیچیده است و مدل‌سازی رسوب با اندازه‌های مختلف، بار بستر، بار معلق، شکل بستر و تاثیر شیب بستر را نیز در بر می‌گیرد.

در این پژوهش علاوه بر بررسی ساختار جریان عبوری از روی تلماسه‌های ساخته شده در آزمایشگاه، شرایط مشابه برای تلماسه‌های فرضی توسعه یافته در طول کانال نیز شبیه‌سازی می‌گردند. مقایسه طول ناحیه جدایی جریان در مدل فیزیکی و شبیه‌سازی شده، گامی مهم در کاربرد و توسعه مدل‌های عددی در علم هیدرولیک رسوب بشمار می‌رود و در مواردی که امکان توسعه مدل‌های فیزیکی میسر نمی‌باشد، مدل‌های کامپیوتری می‌توانند راهکارهای موثری را ارائه نمایند.

مش‌بندی یکی از مهمترین و زمان‌برترین گام‌های اولیه برای توسعه مدل به شمار می‌رود. این کار با وارد کردن داده‌ها در فایل ورودی متنی کوردینا انجام پذیر است. در شکل ۴ و ۵، تعداد سلول‌ها در راستای طولی و عرضی در تلماسه‌های مدل شده (نوع ۴) برابر بوده ولی انتخاب شبکه متراکم‌تر در نزدیکی بستر در شکل ۵، امکان مدل‌سازی قوی و دقیق‌تری را فراهم می‌سازد.

انتخاب تعداد خطوط شبکه در راستای عمق، بستگی به ارتفاع تلماسه مورد نظر دارد. در تلماسه‌ها با زاویه وجه بالادست کمتر از ۱۰ درجه و ارتفاع کمتر از ۵ سانتی‌متر، شبکه بسیار متراکمی پیشنهاد می‌گردد. لازم به ذکر است، متراکم‌تر کردن شبکه، نیازمند به رایانه با قدرت پردازش بالاست و هر نوع مش‌بندی با اندازه دلخواهی را نمی‌توان به سهولت تجزیه و تحلیل نمود.

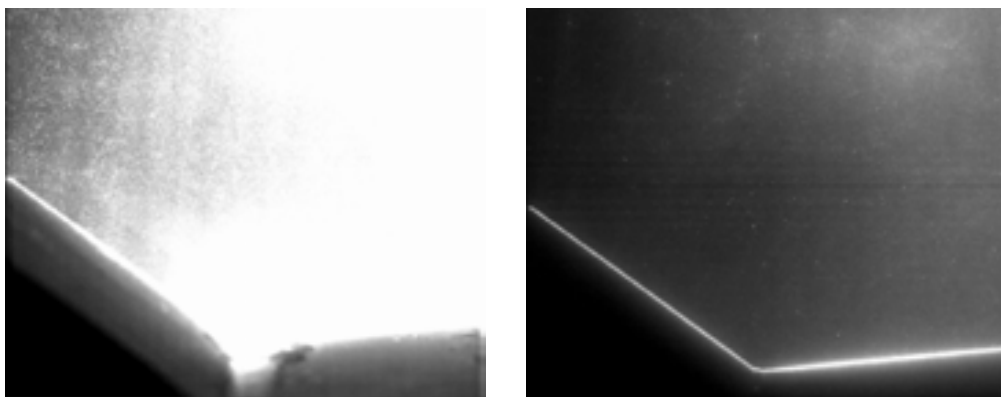
عمق جریان (فاصله عمودی گودترین نقطه تا سطح آب) در ۲ سری (حالت) آزمایش ۳۱/۷ و ۱۹/۵ سانتی‌متر و دبی جریان در دو سری آزمایش دیگر ۳۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شدند. در تمامی آزمایش‌ها تعداد ۱۵-۱۳ پروفیل سرعت در راستای طولی تلماسه پنجم برداشت گردید. اندازه‌گیری داده‌های سرعت و آشفتگی با به کارگیری دستگاه سرعت‌سنج صوتی ADV با فرکانس ۲۰۰ هرتز و به مدت ۲ دقیقه در هر نقطه صورت گرفت. سرعت سنخ مورد استفاده در این آزمایش از نوع (به سمت پهلو) است و نصب آن در فاصله ۵/۵ سانتی‌متری از محور مرکزی به منزله برداشت اطلاعات در محور مرکزی خواهد بود. داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از نرم‌افزار $WinADV$ غربال گشته و پس از آن مورد تحلیل قرار گرفتند.

از جمله ویژگی‌های این تحقیق علاوه بر بررسی برهمکنش تلماسه با ابعاد و اشکال متفاوت با پارامترهای هیدرولیکی مختلف در شناخت عوامل موثر بر جدایی جریان و طول ناحیه جدایی، کاربرد همزمان سرعت‌سنج‌های ADV و PIV می‌باشد.

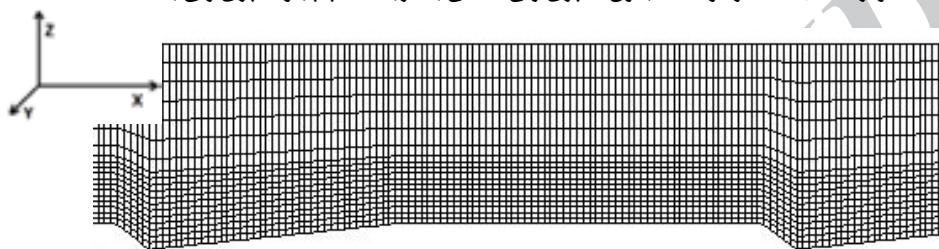
PIV یک تکنیک جدید نوری به منظور سنجش سرعت سیال می‌باشد و از جمله مزایای آن نسبت به سایر تکنیک‌ها و دستگاه‌های اندازه‌گیری موجود مانند $Laser Doppler Velocimetry$ ، $Hot-Wire Anemometry$ و $Acoustic Doppler Velocimetry$ قابلیت اندازه‌گیری سرعت سیال به صورت کلی در واحد زمانی است (توانایی برداشت همزمان میدان جریان را دارد). این تکنیک قابلیت اندازه‌گیری سرعت دو بعدی و سه بعدی نزدیک بستر و سطح آب را داراست. با توجه به سرعت سیستم رایانه‌ای که برای تحلیل داده‌ها استفاده می‌شود می‌توان فواصل نقطه‌های برداشتی را بسیار کم نمود چنانچه قابلیت برداشت داده‌های سرعت در نزدیک بستر و نزدیک سطح آب به ۰/۱ میلی‌متر نیز می‌تواند برسد.

استفاده از سرعت سنخ لیزری (PIV) در کشور ما به علت هزینه بالا و متاسفانه عدم تولید موارد مشابه داخلی، در اکثر دانشگاه‌ها قابل دسترس نمی‌باشد. اگرچه تحقیقات ارزشمند انجام شده در دانشگاه تربیت مدرس در سال‌های اخیر که به منظور بررسی میدان جریان حاصل از پرش‌های هیدرولیکی و تنش‌های برشی نزدیک بستر با استفاده از دستگاه PIV است را نمی‌توان نادیده گرفت و قطعاً به عنوان اولین تحقیقات کاربرد PIV در کشور محسوب می‌شوند (۳) هرچند تاکنون مطالعاتی در زمینه ساختار جریان روی تلماسه‌ها در کشور صورت نگرفته است.

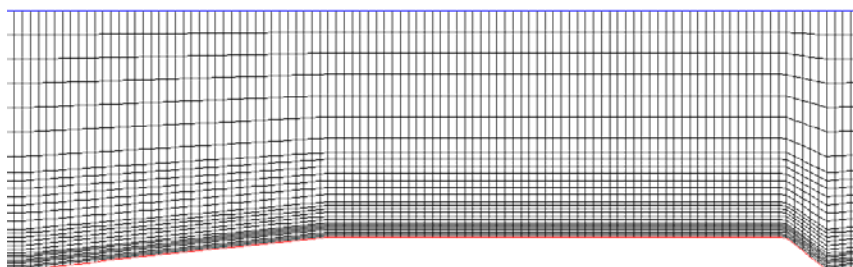
در هنگام کار کردن با PIV به نکات بسیاری باید توجه نمود زیرا کیفیت تصویر تولید شده، بیان آشکاری از کیفیت داده‌های برداشتی است. لذا با تغییر زاویه نورپردازی و در موارد خاص با رنگ آمیزی منطقه مطالعاتی با اسپری سیاه رنگ و استفاده از نوارهای چسب برق سیاه رنگ و گاهاً سوهان کاری و افزایش زبری سطوح می‌توان کیفیت تصاویر تولیدی را بالا برد (مقایسه تصاویر ارائه شده در شکل



شکل ۳- مقایسه تصاویر حاصل شده در دو حالت بدون اسپری زنی مشکی بستر (سمت چپ) و اسپری زنی بستر (سمت راست)



شکل ۴- انتخاب شبکه 100×76 و فواصل ۱ سانتی متری در راستای عمق جریان و فواصل نزدیک بستر



شکل ۵- انتخاب شبکه 100×76 و فواصل ۱ میلی متری در راستای عمق جریان و فواصل نزدیک بستر

نتایج و بحث

نتایج آزمایشگاهی حاصل از اندازه‌گیری پارمتر سرعت با

دستگاه ADV

به منظور بررسی میزان خطای احتمالی بین داده‌های غربال شده^۱ و غربال نشده (خام)^۲ در محاسبه پارامترهای جریان از جمله سرعت جریان، تنش‌های رینولدز و نوسانات سرعت، اغلب از نرم‌افزار *WinADV* استفاده می‌گردد. بررسی‌های عطار (۲)، نصیری (۱۵)،

در نهایت به منظور تسهیل در رسم پروفیل‌های سرعت در فواصل مختلف اندازه‌گیری و مقایسه گرافیکی پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده و مدل سازی شده، یک برنامه گرافیکی به زبان دلفی نوشته شده است. این برنامه با دریافت داده‌های ورودی به صورت یک فایل ساده متنی شامل شکل تلماسه، عمق آب، تعداد نقاط برداشت شده در هر پروفیل و محل پروفیل اندازه‌گیری شده (یا مدل سازی شده) سرعت در راستای طولی، قادر به رسم دقیق پروفیل‌های سرعت در طول تلماسه با شکل دلخواه خواهد بود. همچنین رسم خطوط هم‌سرعت و میانمایی آن در نقاط دلخواه از دیگر قابلیت‌های این برنامه می‌باشد.

- 1- Filtered Data
- 2- Unfiltered Data

فاضل (۲۰۱۰) و داورپناه (۱) نشان می‌دهد که طولانی بودن مدت زمان اندازه‌گیری و مقدار بزرگ فرکانس نمونه‌برداری (۲۰۰ هرتز) که در نتیجه آن تعداد داده‌های زیادی از پارامتر سرعت ثبت می‌گردد، تأثیر غربال نمودن داده‌ها بر متوسط زمانی سرعت جریان محاسبه شده را بسیار ناچیز می‌کند. همچنین در این تحقیق برای کاهش خطای احتمالی و شکل‌گیری بهتر توزیع نوسان‌های سرعت و تنش‌های رینولدز، داده‌ها با شرایط نسبت سیگنال به نویز بیشتر از ۵ دسی‌بل و همبستگی بزرگ‌تر از ۷۰ درصد مورد استفاده قرار گرفتند.

سری اول آزمایش‌ها بر روی تلماسه‌های نوع ۱، ساخته شده از ذرات شن درشت با طول موج ۱ متر، ارتفاع ۰/۰۴ متر، زاویه وجه پایین‌دست تلماسه ۸ درجه، عمق جریان ۰/۳۲ متر و دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه به اجرا درآمدند. در این سری از آزمایش‌ها ۱۳ پروفیل سرعت جریان، شامل ۷ پروفیل بر روی تاج مسطح، ۴ پروفیل در امتداد کانال بر روی شیب وجه بالادست و ۲ پروفیل نیز بر روی شیب وجه پایین‌دست تلماسه برای اندازه‌گیری سرعت جریان در سه بعد در نظر گرفته شدند.

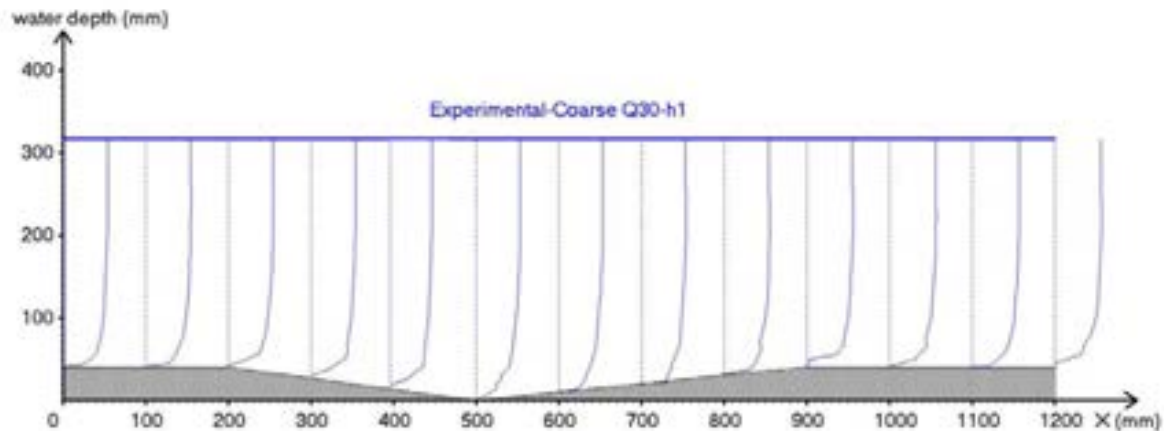
سری دوم آزمایش‌ها بر روی همان تلماسه‌ها، با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عمق جریان کمتر از سری آزمایش اول (۱۹/۵ سانتی‌متر) صورت پذیرفت. پس از حصول شرایط هیدرولیکی مناسب برای اندازه‌گیری دو عمق مختلف جریان و دو دبی ۳۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه بر روی مجموع تلماسه‌های درشت‌بافت و ریزبافت، سری‌های آزمایش بعدی بر روی تلماسه‌های نوع ۲، ۳ و ۴ صورت پذیرفتند. نتایج حاصل از انجام ۲۸ سری آزمایش بر روی تلماسه‌ها در جدول ۲، خلاصه شده‌اند. لازم به ذکر است که عدم وجود شرایط هیدرولیکی خاصی در جدول (همچون تلماسه نوع ۱، ریزبافت با دبی ۶۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۱۹/۵ سانتی‌متر) دلیل بر عدم امکان ایجاد شرایط آزمایشگاهی مناسب برای ثابت نمودن تلماسه‌ها و شست و شوی مکرر ذرات توسط جریان اعمالی بوده است.

در تلماسه‌های با تاج تیز به دلیل شکل هندسی بستر و نیز طبق رابطه پیوستگی، واگرایی در خطوط جریان بعد از قله و همگرایی بر وجه بالادست در جریان دائمی انتظار می‌رود. پژوهشگرانی همچون بنت و بست (۶)، ون‌دیتی و بنت (۱۸)، عطار (۲) و نصیری (۱۵) که آزمایش‌های خود را بر روی این نوع تلماسه‌ها انجام دادند، چنین الگویی را در خطوط جریان مشاهده نمودند. بدین‌گونه که سرعت جریان در نزدیکی تاج و به دنبال آن در شیب وجه پایین‌دست تلماسه به تدریج کاهش یافته تا به مقدار صفر رسیده، گاه منفی شده و مجدداً به سمت وجه بالادست آن روند افزایشی را در پیش می‌گیرند تا در بخش تاج تلماسه بعدی به بیشینه مقدار خود می‌رسند. در محل اتصال دو تلماسه به یکدیگر، با حضور مقادیر منفی سرعت جریان به صورت مداوم در حال گردش بوده و به پایین‌دست منتقل نمی‌شود که در پی آن محدوده جدایی جریان شکل می‌گیرد. فاصله محل جدایی جریان از بستر و نقطه اتصال مجدد آن، طول ناحیه جدایی جریان خوانده شده (L)، که مقایسه آن در تلماسه‌های مختلف و شرایط

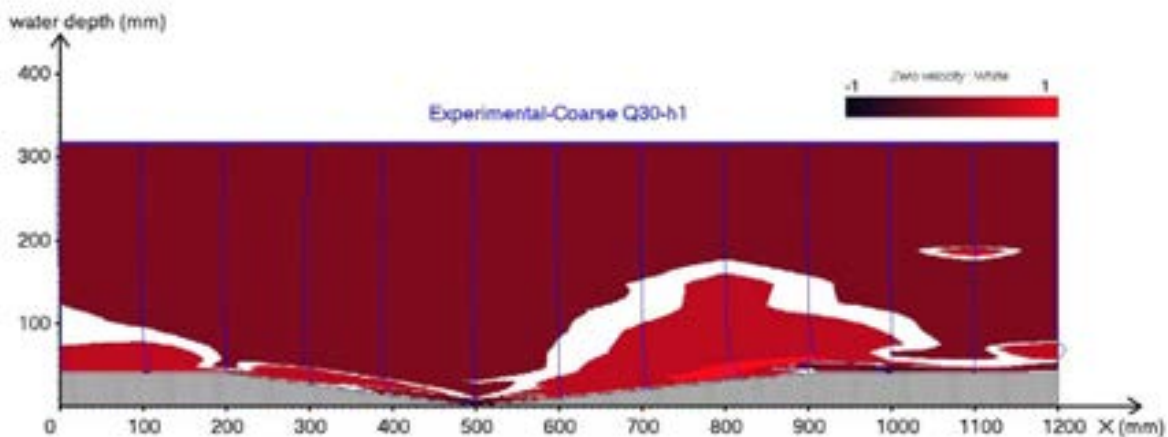
شکل ۶ نقشه منحنی‌های هم‌سرعت در راستای جریان (۱۴) را در طول تلماسه نوع ۱ که توسط برنامه گرافیکی مذکور تهیه شده است، را نشان می‌دهد. پروفیل‌های سرعت مثبت اندازه‌گیری شده نشانگر عدم مشاهده جدایی جریان در محل اتصال دو تلماسه هستند.

شکل ۷، نقشه منحنی‌های هم‌سرعت را در راستای عمود بر جریان (۱۴) نشان می‌دهد. مقادیر متوسط سرعت در راستای عمود بر جریان، در طول یک تلماسه منفی هستند و در اغلب سری آزمایش‌های انجام شده بر روی تلماسه‌های نوع ۱ و ۲ (با زاویه ایستایی کوچک) بر روی شیب وجه بالادست تلماسه دارای مقادیر نزدیک به صفر است، رنگ سفید در شکل، تا تاج مسطح تلماسه بعدی ادامه می‌یابد. همچنین مقادیر سرعت منفی در بخش فرورفته تلماسه و وجه پایین دست تا نزدیک بستر پیش می‌آیند.

نتایج حاصل از مطالعات نصیری (۱۵) در تلماسه‌های با تاج تیز و زاویه وجه پایین‌دست بزرگ (۳۵ درجه)، نشان می‌دهد سرعت متوسط در راستای عمود بر جریان بر روی تاج نزدیک به صفر است و سرعت‌های عمودی در ناحیه جدایی جریان ایجاد شده، مقادیری مثبت بزرگی دارند. تفاوت الگوی سرعت‌های عمودی ایجاد شده در محل اتصال دو تلماسه به یکدیگر در پژوهش حاضر با مطالعات نصیری (۱۵)، کوچکتر بودن ناحیه جدایی جریان را بر روی تلماسه‌های با شیب ملایم، نشان می‌دهد.



شکل ۶- نمایش پروفیل‌های سرعت در راستای جریان (14) در آزمایش سری اول

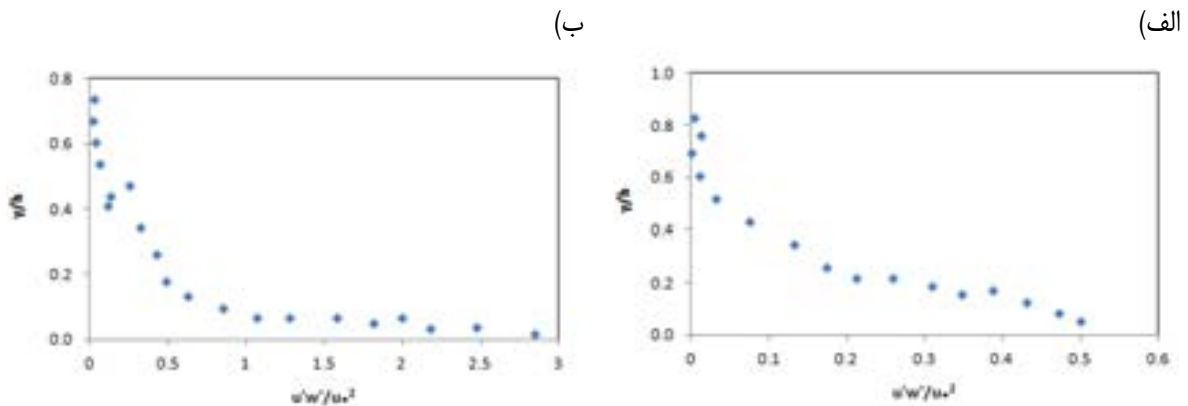


شکل ۷- نمایش پروفیل‌های سرعت در راستای عمود بر جریان (14) در آزمایش سری اول

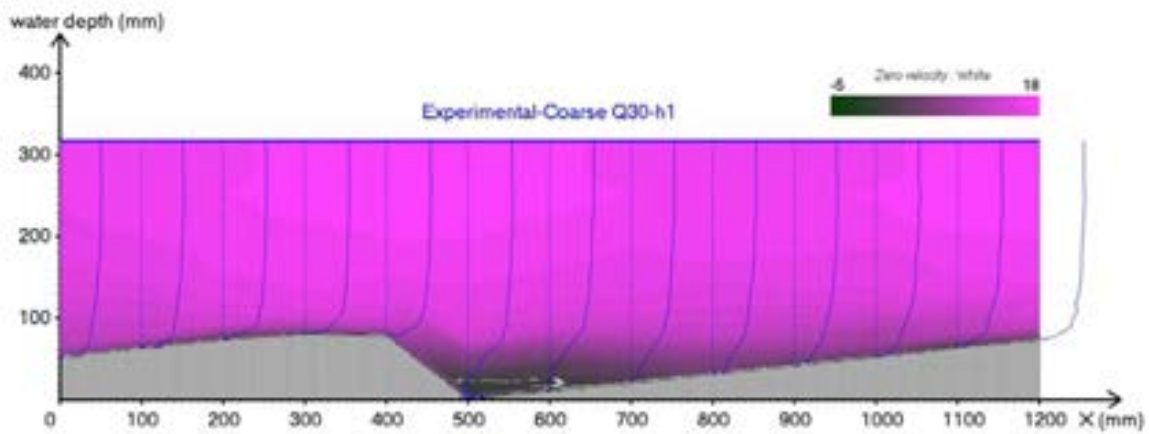
کاربرد تنش‌های رینولدز برای برآورد تنش برشی بستر در حضور شکل‌های گوناگون هندسی مناسب است. در شرایط هیدرولیکی متفاوت اعمال شده بر روی تلماسه‌های با شیب ملایم، پارامتر بدون بعد تنش‌های برشی رینولدز در نزدیکی بستر بیشینه بوده و سپس تا سطح آب روند کاهشی دارد (شکل ۸). روند کاهشی غیر خطی مشاهده شده با نتایج حاصل از بررسی‌های یانگ و همکاران (۱۹) مبنی بر انحراف توزیع تنش رینولدز از توزیع خطی استاندارد در نتیجه حضور سرعت عمودی غیر صفر، مطابقت دارد. لازم به ذکر است که در مطالعات سال‌های اخیر نتایج نشان می‌دهد که به علت وجود توربولانس در وجه پایین دست تلماسه‌ها، کاربرد یک پروفیل منفرد در برآورد تنش برشی بستر و همچنین سرعت برشی (u^*) برای بدون بعد کردن پارامترها مناسب نیست و کاربرد مقادیر متوسط مکانی توصیه می‌شود. همچنین در مواقعی که برون‌یابی بخش نزدیک بستر در

برای برآورد سرعت برشی استفاده می‌شود، مقدار صفر را تخمین می‌زنند، کاربرد برون‌یابی داده‌های متوسط مکانی تنش برشی رینولدز پیشنهاد می‌گردد. در این پژوهش تنها مقادیر نزدیک به صفر در نزدیکی سطح آزاد جریان حاصل گردیده و مقادیر منفی مشاهده نشدند. این بدان معناست که تلماسه‌ها قادر نیستند که لایه نزدیک به سطح آب را تحت تأثیر قرار دهند. مقادیر کوچکتر تنش رینولدز در شکل (۸الف) نسبت به (۸ب) می‌تواند ناشی از تأثیر بیشتر مقادیر سرعت عمودی (14) نزدیک به صفر در وجه بالادست تلماسه نسبت به وجه پایین دست آن باشد.

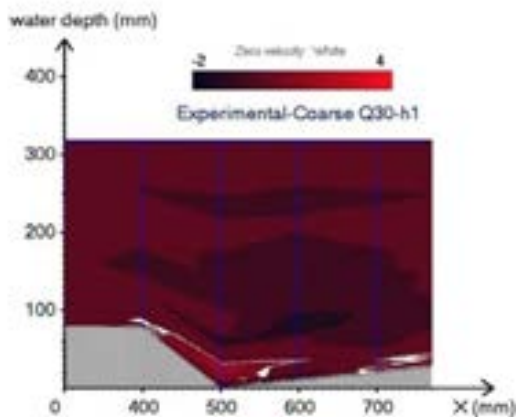
در سری آزمایش‌های انجام شده بر روی تلماسه‌های نوع ۳، شکل ۹، جدایی جریان حاصل از افزایش زاویه وجه پایین دست را نشان می‌دهد.



شکل ۸- نمای تغییرات پروفیل‌های بدون بعد تنش رینولدز ($\overline{u'u'}$) در آزمایش سری اول، الف - وجه بالادست تلماسه، ب- وجه پایین دست تلماسه



شکل ۹- نمایش پروفیل‌های سرعت در راستای جریان (۱) در آزمایش سری پنزدهم



شکل ۱۰- نمایش پروفیل‌های سرعت در راستای عمود بر جریان (۲) در محل اتصال دو تلماسه از نوع ۳ در آزمایش سری پنزدهم

بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی در تلماسه‌های بلند، پروفیل‌های سرعت بر روی شیب وجه پایین دست تلماسه در نزدیکی محل فرورفته تلماسه برگشته و سرعت ابتدا مقادیر صفر (محدوده سفید رنگ) و سپس مقادیر منفی به خود می‌گیرد و این سرعت‌های منفی تا بخش ابتدایی شیب وجه بالادست ادامه می‌یابند تا دوباره به مقدار صفر برسند. تغییرات به صورت گسترده، تدریجی و کاملاً محسوس بوده و ارتباط مستقیم هندسه تلماسه را با جدایی جریان نشان می‌دهند.

شکل ۱۰، سرعت‌های عمودی در ناحیه جدایی جریان ایجاد شده را که دارای مقادیر مثبت بزرگی هستند نشان می‌دهد. این شکل تفاوت الگوی جریان حاضر و الگوی جریان عبوری از روی تلماسه‌هایی که جدایی جریان به طور محسوس در آن مشاهده نمی‌شود (شکل ۷)، را نشان می‌دهد.

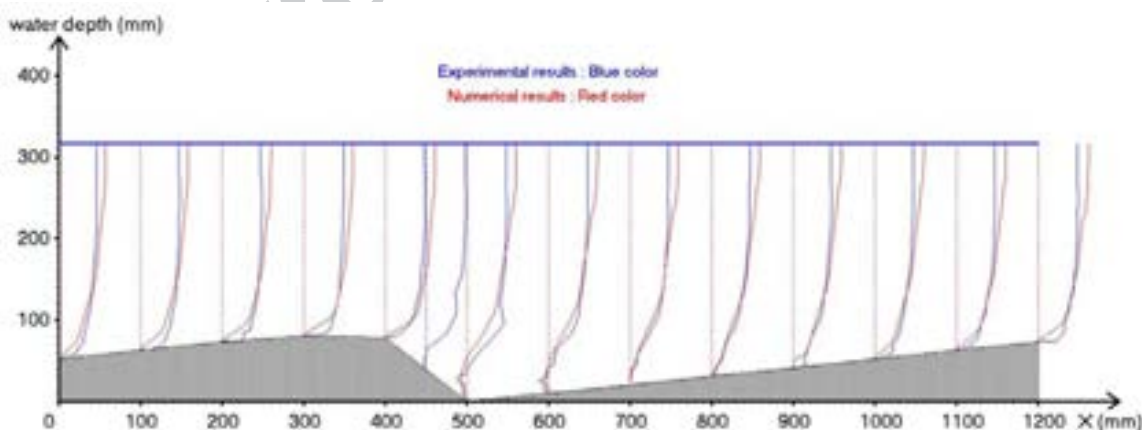
نتایج حاصل از مدل‌سازی پروفیل‌های سرعت جریان عبوری از روی تلماسه‌ها

عدم مشاهده ناحیه جدایی جریان در تلماسه‌های ریزافت با ارتفاع ۴ سانتی‌متر و مقایسه آن با شرایط هیدرولیکی مشابه تلماسه‌های ریزافت با ارتفاع بیشتر، که جدایی جریان در آن‌ها قابل مشاهده است، سبب بکارگیری رایانه در مدل‌سازی تلماسه‌ها گردید. شبیه‌سازی تلماسه‌ها در شرایط هیدرولیکی متفاوت و کالیبره نمودن آن‌ها با مدل‌های فیزیکی گامی جدید در مهندسی هیدرولیک رسوب است که نتایج حاصل از آن با مقادیر اندازه‌گیری شده همخوانی بسیار مناسبی را نشان می‌دهند.

مقایسه پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده در سری ۱۵، با پروفیل‌های سرعت شبیه‌سازی شده توسط مدل هیدرولیکی "سیم" همخوانی مناسبی را از نظر شکل توزیع محل جدایی جریان و مکان نقطه اتصال مجدد جریان نشان می‌دهد (شکل ۱۱).

نتایج حاصل از مدل‌سازی، عدم مشاهده ناحیه جدایی جریان را در تلماسه‌های با شیب ملایم (نوع ۱ و ۲) و شرایط هیدرولیکی اعمالی تایید کرده (شکل ۱۲) و صحت فرضیه وجود رابطه خطی بین طول ناحیه جدایی جریان و ارتفاع تلماسه را نشان می‌دهد. حضور ناحیه جدایی جریان مدل شده (شکل ۱۳) در سری آزمایش‌های ۲۵ الی ۲۸ (تلماسه‌های نوع ۴ ریزافت) و عدم مطابقت آن با موارد اندازه‌گیری شده توسط ADV ، نشان می‌دهد که عدم مشاهده ناحیه جدایی جریان توسط ADV ، نشانه عدم وجود ناحیه جدایی جریان نیست و لذا به ابزارهای قوی‌تری نظیر PIV برای اندازه‌گیری سرعت جریان و پدیده جدایی جریان در نزدیک بستر نیاز است.

- نتایج حاصل از مقایسه سری آزمایش‌های ۱۵ الی ۲۰ و مقادیر ارائه شده از طول ناحیه جدایی جریان در جدول ۲، به شرح زیر است:
- ۱- برای دو تلماسه مشابه در حالت استقرار و سرعت جریان یکسان، طول ناحیه جدایی جریان حاصل از حضور تلماسه در اعماق کمتر جریان، بزرگتر می‌باشد.
 - ۲- با افزایش سرعت جریان در دو تلماسه مشابه و با عمق یکسان، طول ناحیه جدایی جریان افزایش می‌یابد.
 - ۳- همچنین بررسی نتایج حاصل از طول ناحیه جدایی جریان در مجموع سری آزمایش‌های ۱ الی ۲۸ علاوه بر تایید نتایج ذکر شده، نشان می‌دهند که:
 - ۴- از بین پارامترهای موجود و موثر در جدایی جریان، زاویه ایستایی و سپس ارتفاع تلماسه، به ترتیب از مهمترین و کلیدی‌ترین پارامترها می‌باشند.
 - ۵- تحت شرایط هیدرولیکی یکسان در تلماسه‌هایی با تاج تخت، طول ناحیه جدایی جریان و محل وقوع آن نسبت به تلماسه‌های تاج تیز کمتر است.
 - ۶- یک رابطه خطی مشخصی بین طول ناحیه جدایی جریان و ارتفاع تلماسه‌ها موجود است.
 - ۷- نسبت طول ناحیه جدایی جریان اندازه‌گیری شده به ارتفاع تلماسه (L/Δ) در شرایط متفاوت هیدرولیکی حدود $3/5$ در تلماسه نوع ۳ و حدود $3/8$ در تلماسه نوع ۴ برآورد گردیده است که این ارقام از موارد گزارش شده ($L/\Delta=5/8$) اوها و مزومدار (۱۶) و $L/\Delta=6$ در مرجع لین (۱۳)، کمتر می‌باشد.
 - ۸- در تمام انواع تلماسه‌ها با نزدیک شدن به سطح آب و گذر از لایه برشی تغییرات سرعت نسبتاً یکنواخت می‌گردد و این امر مبین عدم تأثیر شکل بستر بر ساختار جریان در اعماق نزدیک به سطح آب است.



شکل ۱۱- نمایش مقایسه پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تلماسه با زاویه بزرگ

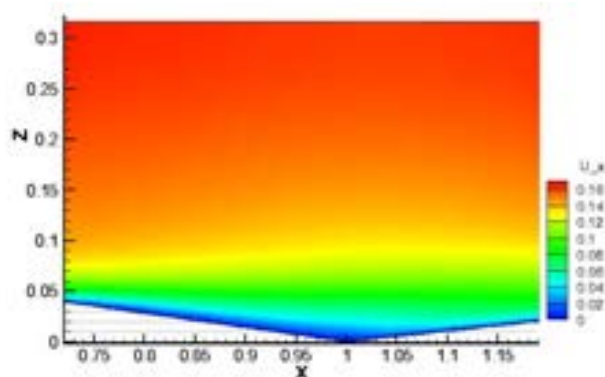
جدول ۲- نتایج حاصل از اندازه طول ناحیه جدایی جریان در دو مدل فیزیکی و عددی

L/Δ	طول ناحیه جدایی جریان برآورد شده (L') (cm)	طول ناحیه جدایی جریان اندازه گیری شده (L) (cm)	سرعت حداکثر (cm/s)	عمق جریان (cm)	دبی (lit/sec)	اندازه ذرات شن	نوع تلماسه	سری
تلماسه‌های با زاویه کوچک								
.	.	.	۱۹	۳۱/۷	۳۰	درشت	۱	۱
.	.	.	۳۳	۱۹/۵	۳۰	درشت	۱	۲
.	.	.	۳۸	۳۱/۷	۶۰	درشت	۱	۳
.	.	.	۱۹	۳۱/۷	۳۰	ریز	۱	۴
.	.	.	۳۳	۱۹/۵	۳۰	ریز	۱	۵
.	.	.	۳۸	۳۱/۷	۶۰	ریز	۱	۶
.	.	.	۲۰	۳۱/۷	۳۰	درشت	۲	۷
.	.	.	۴۰	۱۹/۵	۳۰	درشت	۲	۸
.	.	.	۴۱	۳۱/۷	۶۰	درشت	۲	۹
.	.	.	۶۱	۱۹/۵	۶۰	درشت	۲	۱۰
.	.	.	۲۱	۳۱/۷	۳۰	ریز	۲	۱۱
.	.	.	۴۰	۱۹/۵	۳۰	ریز	۲	۱۲
.	.	.	۴۱	۳۱/۷	۶۰	ریز	۲	۱۳
.	.	.	۶۳	۱۹/۵	۶۰	ریز	۲	۱۴
تلماسه‌های با زاویه بزرگ								
۲/۲	۱۸/۸	۱۷/۵	۱۸	۳۱/۷	۳۰	درشت	۳	۱۵
۲/۷	۲۲/۹	۲۱/۸	۴۰	۱۹/۵	۳۰	درشت	۳	۱۶
۲/۲	۱۸/۸	۱۸/۲	۳۸	۳۱/۷	۶۰	درشت	۳	۱۷
۳/۳	۲۲/۳	۲۶/۱	۸۲	۱۹/۵	۶۰	درشت	۳	۱۸
۳/۵	۱۸/۳	۲۷/۴	۱۶	۳۱/۷	۳۰	ریز	۳	۱۹
۳/۲	۲۱/۱	۲۵/۹	۳۵	۱۹/۵	۳۰	ریز	۳	۲۰
۱/۴	۸/۸	۵/۵	۱۹	۳۱/۷	۳۰	درشت	۴	۲۱
۳	۹/۷	۱۲/۱	۳۶	۱۹/۵	۳۰	درشت	۴	۲۲
۱/۹	۸/۸	۷/۸	۳۶	۳۱/۷	۶۰	درشت	۴	۲۳
۳/۸	۹/۶	۱۵/۵	۶۹	۱۹/۵	۶۰	درشت	۴	۲۴
.	۶/۸	.	۲۰	۳۱/۷	۳۰	ریز	۴	۲۵
.	۹/۲	.	۳۸	۱۹/۵	۳۰	ریز	۴	۲۶
.	۶/۸	.	۳۷	۳۱/۷	۶۰	ریز	۴	۲۷
.	۹/۱	.	۶۹	۱۹/۵	۶۰	ریز	۴	۲۸

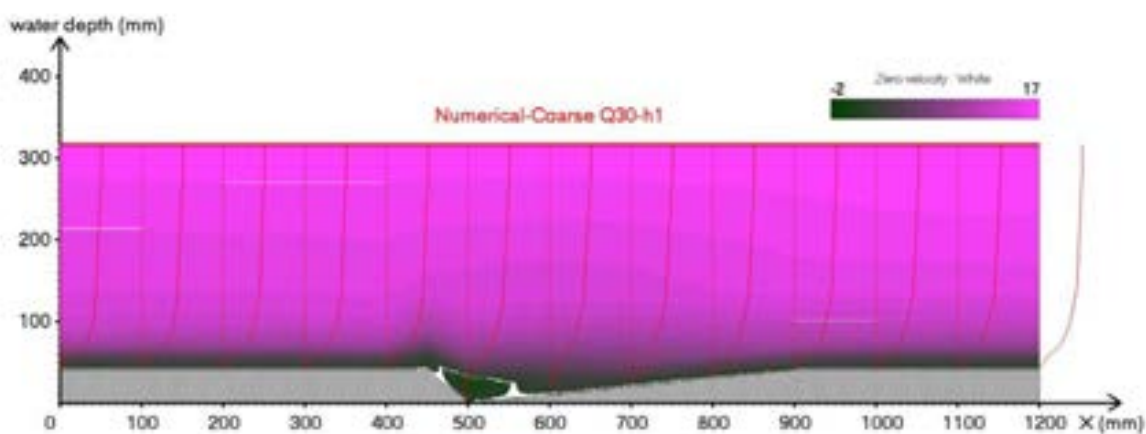
نتایج حاصل از کاربرد دستگاه PIV در شرایط هیدرولیکی مشابه و همچنین کاهش زبری ذرات در شکل ۱۴ ارائه شده است. جریان مدل شده توسط سیم از تلماسه نوع ۴، نیز نتایج مشابهی با PIV را نشان می‌دهد (شکل ۱۵) که مبین ناحیه جدایی جریان کوچک برای این نوع شکل بستر است.

نتایج آزمایشگاهی حاصل از اندازه‌گیری پارامتر سرعت با دستگاه PIV

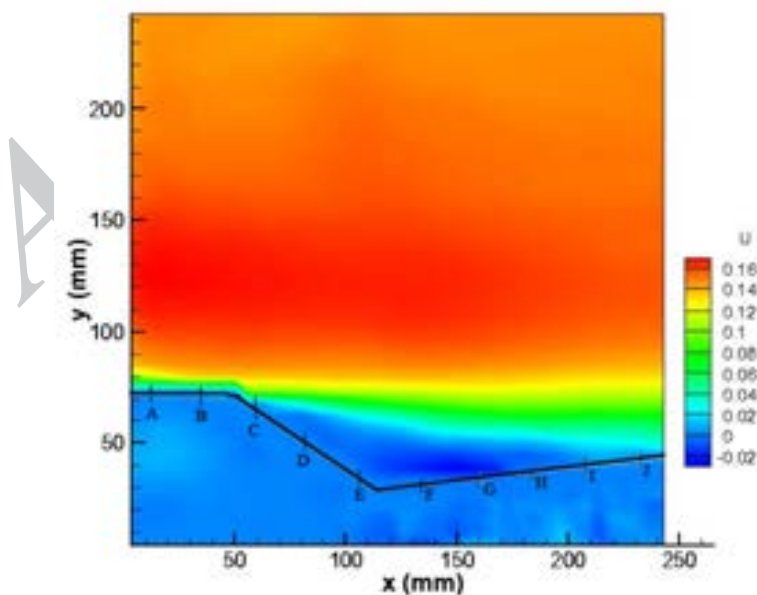
با نگاهی دقیق‌تر به جدول ۲، این سوال مطرح می‌شود که آیا کاهش اندازه قطر ذرات در تلماسه‌های با ارتفاع (۴ سانتی‌متر) و یا به مفهومی دیگر کاهش زبری جریان، سبب ایجاد شرایطی شده است که مانع جدایی جریان می‌گردد و یا این عدم مشاهده ناحیه جدایی حاصل از ضعف اندازه‌گیری‌های دستگاه ADV است؟



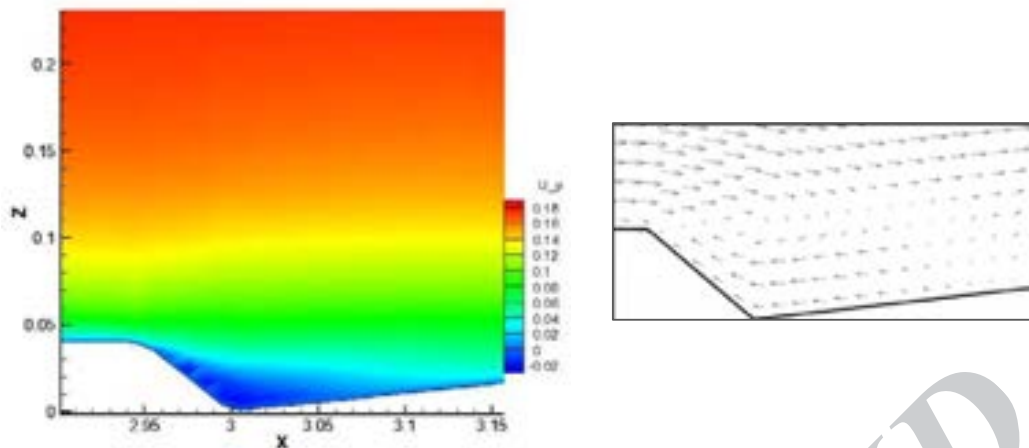
شکل ۱۲- نمایی از منحنی‌های هم‌سرعت در راستای جریان (u) در تلماسه مدل‌سازی شده از نوع اول و تایید عدم وجود ناحیه جدایی



شکل ۱۳- پروفیل‌های سرعت جریان مدل‌سازی شده در راستای جریان (u) در شرایط هیدرولیکی دبی ۳۰ lit/s



شکل ۱۴- نمایی از منحنی‌های هم‌سرعت اندازه‌گیری شده توسط PIV در راستای طولی کانال، (سری آزمایش ۲۵) و حضور ناحیه جدایی جریان



شکل ۱۵- نمایی از منحنی‌های هم‌سرعت مدل سازی شده در راستای طولی کانال، (سری آزمایش ۲۵) و حضور ناحیه جدایی جریان

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- تلماسه‌ها وجود دارد.
- طول ناحیه جدایی جریان اندازه‌گیری شده در تلماسه با شکل و هندسه متفاوت دارای تغییرات حدود $1/5-3/8$ برابر ارتفاع تلماسه می‌باشد.
- با کاهش ارتفاع تلماسه به میزان ۵۰ درصد، طول ناحیه جدایی جریان حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد.
- زاویه و وجه پایین دست و ارتفاع تلماسه، به ترتیب از مهمترین پارامترهای موثر در طول جدایی جریان می‌باشد. چنانچه زاویه وجه پایین دست ۸ درجه در مقایسه با ۳۸ درجه جدایی جریان نامحسوسی را سبب می‌شود و ارتفاع ۸ سانتی‌متری در مقایسه با سایر ارتفاع‌های در نظر گرفته شده برای تلماسه‌ها، جدایی جریان بیشتری را سبب می‌گردد.
- نتایج حاصل از بررسی برهم‌کنش انواع شکل‌های بستر شنی بر توزیع‌های سرعت جریان، تنش‌های رینولدز و نیز بررسی طول ناحیه جدایی جریان و اتصال مجدد از تلماسه‌های ساخته شده و شبیه‌سازی شده به صورت زیر خلاصه می‌گردد:
- طول ناحیه جدایی جریان در دو تلماسه با شکل هندسی مشابه، برای جریان با عمق کمتر، بزرگ‌تر می‌باشد.
- طول ناحیه جدایی جریان در دو تلماسه با شکل هندسی مشابه، با افزایش سرعت جریان، افزایش می‌یابد.
- در تلماسه‌هایی با تاج تخت، طول ناحیه جدایی کوتاه‌تر از طول ناحیه جدایی در تلماسه‌های با تاج تیز است.
- یک رابطه خطی مشخص بین طول ناحیه جدایی جریان و ارتفاع

منابع

- ۱- داورپناه ش. ۱۳۹۰. بررسی برهم‌کنش شکل‌های بستر شنی با تاج مسطح و پوشش گیاهی دیوار بر مولفه‌های جریان آشفته. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی. دانشگاه صنعتی اصفهان.
- ۲- عطار ش. ۱۳۸۷. تأثیر شکل بستر شنی بر توزیع‌های سرعت جریان و تنش برشی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی. دانشگاه صنعتی اصفهان.
- ۳- مهرآیین م. و صالحی نیشابوری س.ع.ا. ۱۳۹۰. مطالعه آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی بر روی پله با استفاده از PIV، نشریه مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشکده فنی، دوره ۴۵، شماره ۱، فروردین ۱۳۹۰، ۸۷-۹۷.
- 4- Allen J.R.L. 1982. Sedimentary Structures: their character and physical basis. Elsevier, Amsterdam, 539pp.
- 5- Ashley G.M. 1990. Classification of large-scale subaqueous bed forms: a new look at an old problem. J. Sediment. Petrol. 60: 160-172.
- 6- Bennett S.J., and Best J.L. 1995. Mean flow and turbulence structure over fixed, two-dimensional dunes: Implication for sediment transport and bed form stability. Sedimentology, Vol. 42, PP. 491-513.

- 7- Best J.L. 1993. On the interaction between turbulent flow structure, sediment transport and bedform development: some considerations from recent experimental research. In: N. J. Clifford, J. R. French, and J. Hardisty (Eds.), *Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport*, John Wiley & Sons Ltd., New York, 360pp.
- 8- Best J., and Kostaschuk R. 2002. An experimental study of turbulent flow over a low angle dune. *J. Geophys. Res.* 107, 3135.
- 9- Darby S.E. 1999. Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential. *J. Hydraul. Eng.*, ASCE.125: 443-454.
- 10- Dinehart R.L. 1992. Evolution of coarse gravel bedforms: field measurements at flood stage. *Water Resour. Res.* 28: 2667-2689.
- 11- Kennedy J.F. 1963. The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels. *J. Fluid Mech.* 16: 4: 521-544.
- 12- Kostaschuk R., and Villard P. 1996. Flow and sediment transport over large subaqueous dunes: Fraser River, Canada. *Sedimentology*, 43, pp. 849-863.
- 13- Lyn D.A. 1993. "Turbulence measurements in open-channels flows over artificial bedforms." *Journal of Hydraulic Engineering*, Hyd. Engrg., ASCE. 119 (3), 306-326.
- 14- McLean S.R. 1990. The stability of ripples and dunes. *Earth Sci. Rev.* 29: 131-144.
- 15- Nasiri Dehsorkhi N., Afzalimehr H., and Singh V.P. 2011. Effects of bedforms and vegetated banks on velocity distributions and turbulent flow structure. *J. Hydrol. Eng.*, ASCE. 16. 495.
- 16- Ojha S.P., and Mazumder B.S. 2008. "Turbulence characteristics of flow region over a series of 2-D dune shaped structures." *Advances in Water Resources*, 31, 561-576.
- 17- Olsen N.R.B. 2011. A Three-Dimensional Numerical Model For Simulate Of Sediment Movements In Water Intakes With Multiblock Option. Users's Manual, by Nils Reidar B. Olsen, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology.
- 18- Venditti J.G., and Bennett S.J. 2000. Spectral analysis of turbulent flow and suspended sediment transport over fixed dunes. *J. Geophys. Res.* 105: 22035-22047.
- 19- Yang S.Q., Tan S.K., and Lim S.Y. 2004. Velocity Distribution and dip phenomena in smooth and straight open channel flow. *J. Hydraul. Eng.* ASCE, 130: 1179-86.

Archive



Experimental Investigation of Dune Dimensions on Flow Structure and Separation Length using ADV and PIV

A. Motamedi^{1*} - H. Afzalimehr²

Received: 30-07-2012

Accepted: 10-03-2013

Abstract

This research presents recent advances on morphodynamic modeling over gravel dunes. Experiments were carried out on flow over 4 different dunes developed in 12m flume at Institute of Hydraulic Engineering and Water Resource Management of Technical University of Graz, Austria. Dunes are developed in the height of 4, 6 and 8 cm and in wavelength of 1m with 2 different particle sizes (6 and 13 mm) and also two different lee angles (38 and 8 degree). The separation of flow over gravel fixed dunes is investigated by Acoustic Doppler Velocimetry (ADV) and Particle Image Velocimetry (PIV) and to compare the experimental results with numerical models over dunes, the 3D numerical model (SSIIM) is applied in this study. The results show that for the same two dunes under the same velocity but different flow depths, larger separation occurs under lower flow depths and a decrease in dune height causes a reduction in length of separation. Moreover the separation zone has a strong relation with lee angle and in the situation of low lee angle no flow separation was detected. Finally the result reveal that numerical model successfully simulate flow over dune in compared with ADV and PIV data. Although ADV application near the bed indicates probably weak performance for high discharge and low water depth of dune No.4, PIV results present more agreement with the numerical model in this region.

Keywords: Gravel Dune Dimensions, Flow Structure, Separation Zone, SSIIM Modelling, PIV

1- PhD Student, Department of Water Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan and Water-Sewage Engineering Expert in Water and Wastewater Ministry of Isfahan

(* - Corresponding Author Email: Artemis.mot@gmail.com)

2 - Associate Professor, Department of Water Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan