

بررسی توزیع سرعت و شدت آشفته‌گی در حضور تلماسه و پوشش گیاهی در یک کانال مستطیلی روباز

محبوبه قاسمی¹، منوچهر حیدرپور^{2*}، سیدحسن طباطبائی³

1- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

* heidar@cc.iut.ac.ir

چکیده - نظر به اهمیت شکل‌های بستر نظیر تلماسه‌ها در کنترل میزان انتقال رسوب، تولید اغتشاش و مقاومت جریان و همچنین نقش پوشش گیاهی در انتقال جریان و جرم در رودخانه‌ها، کانال‌ها و تالاب‌ها، ضرورت مطالعه ساختار جریان در اثر برهم‌کنش پوشش گیاهی و تلماسه بیش از پیش مطرح می‌گردد. هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر ارتفاع تاج تلماسه در حضور پوشش گیاهی بر توزیع سرعت و شدت آشفته‌گی است. بدین‌نظور مدل فیزیکی شامل تلماسه‌ها با طول موج یک متر، دو ارتفاع تاج 0/04 و 0/08 متر، شیب وجه پایین‌دست 28 درجه و عرضی برابر عرض کانال تهیه شد. شن مورد استفاده برای ساخت تلماسه‌ها دارای قطر متوسط 14 میلی‌متر می‌باشد. برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی کناری رودخانه‌ها از ساقه برنج استفاده گردید. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع تاج تلماسه، ناحیه جدایی جریان از نزدیکی تاج تلماسه با ارتفاع 4 سانتی‌متر به نزدیکی بخش فرورفته انتقال می‌یابد. مقدار بیشینه تنش با افزایش ارتفاع تاج تلماسه در فاصله دورتری از بستر اتفاق می‌افتد. بیشینه نوسانات در راستای جریان روی تلماسه با ارتفاع تاج 4 سانتی‌متر روی وجه بالادست قرار گرفته است. در حالی که این مقدار در تلماسه با ارتفاع 8 سانتی‌متر در بالای ناحیه جدایی جریان در منطقه برخواستگی اتفاق افتاده است.

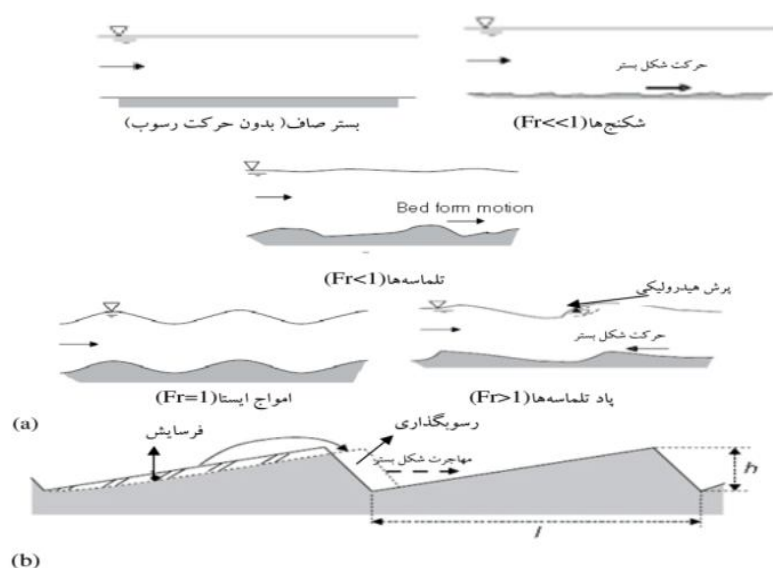
کلیدواژگان: تلماسه، ساختار جریان، پوشش گیاهی، جدایی جریان.

1- مقدمه

جریان در ارتباط هستند به کار می‌رود. با وجود این عنوان‌های مختلف، (Ashley 1990) عنوان «تلماسه» را برای این سری شکل‌ها پیشنهاد داد. شکل 1 انواع شکل بستر را نشان می‌دهد.

در بسترهای مسطح بدون شیب، سرعت جریان در بستر صفر بوده و در سطح آزاد جریان، دقیقاً خارج از لایه مرزی به حداکثر خود می‌رسد. در جریان‌های کم‌عمق مانند بیشتر رودخانه‌ها، لایه مرزی تا سطح آب ادامه می‌یابد.

در مهندسی رودخانه و هیدرولیک، تلماسه‌ها یکی از اشکال مهم بستر بوده و تأثیر بسزایی بر خصوصیات آشفته‌گی دارند. شکل‌های بستر، به تمام نوسانات بستر بدون توجه به شکل و اندازه آنها گفته می‌شود. شکنج‌ها، شکل‌های بستر کوچک مقیاس با ارتفاع کمتر از 0/1 متر و طول موج کوچکتر از 0/5 متر می‌باشند که به عمق جریان بستگی دارند. عناوین تلماسه، شکنج خیلی بزرگ و امواج شنی برای توضیح شکل‌های بستر بزرگتر که با عمق



شکل 1 (a) انواع شکل بستر (b) شکل بستر متحرک

میدان جریان روی تلماسه‌های دوبعدی در آزمایشگاه به صورت گسترده مطالعه و به 5 منطقه اصلی تقسیم شده است (Bennett and Best, 1995; Ashley, 1990).

2- منطقه جدایی²: خطوط جریان منفصل گشته و جدایی جریان در وجه پایین دست به همراه الگوی گردشی می باشد.

4- منطقه خارجی⁴: نزدیک سطح آب و گسترده روی منطقه برخاستگی.

5- لایه مرزی داخلی⁵: نشأت گرفته از نقطه پیوست مجدد در وجه پایین دست و گسترش یافته به سمت قله بعدی. مرز بین ناحیه برخاستگی و منطقه خارجی نزدیک سطح آب را "لایه برشی"⁶ می نامند.

در بیشتر موقعیت‌ها، رسوبات به صورت ذرات غیرچسبنده عمل می‌کنند و جریان می‌تواند بستر را به شکل‌های گوناگونی تغییر دهد. شکل بستر از نیروی بالابر با حرکت رسوبات ایجاد می‌شود (Caroll, 2002). در سرعت‌های

1. Accelerated
2. Separation cell
3. Wake region
4. Outer-near surface region
5. Internal boundary layer
6. Shear layer

- سه بعدی (3D)، در همان اندازه ذرات، در سرعت‌های بالاتر اتفاق می‌افتد.

تلماسه‌ها معمولاً بسیار نامتقارن بوده و اغلب به صورت سه‌بعدی شکل می‌گیرند. شیب بالادست آنها حدود 2 تا 6 درجه و شیب پایین‌دست، دارای زاویه ایستایی حدوداً 30 درجه می‌باشد (McLean, 1990).

در چند دهه اخیر آزمایش‌های بسیاری در مورد ساختار جریان روی تلماسه‌ها انجام گرفته است. مطالعات Van Nelson et al., Lyn (1993), Mierlo and de Ruiter (1998), Venditti and al. (1993), Bennett and Best (1995), Jerolmack and Mohring (2005), Venditti (2007), Ojha and Mazumder (2008), Mazumder et al. (2009) و Nasiri Dehsorkhi et al. (2010) از جمله مطالعات انجام گرفته روی شکل‌های بستر می‌باشند.

Van Mierlo and de Ruiter (1998) دو آزمایش در زمینه بررسی جریان روی شکل بستر طراحی کرده‌اند که به عنوان اولین مطالعه دقیق جزئیات جریان روی تلماسه‌های ثابت شناخته شده است. طی آزمایش‌های انجام شده، مقادیر مثبت $u'w'$ که ممکن است ناشی از جریان برگشتی در ناحیه برخاستگی بعد از قله باشند، مشاهده شده است. نقطه پیوست مجدد در مکانی قرار گرفته که تنش برشی کف در آنجا صفر باشد.

Lyn (1993) جریان روی دو شکل بستر یک بعدی مصنوعی و ثابت را مطالعه کرده است. از جمله نتایج این مطالعه این است که سرعت برشی، وابسته به اندازه سرعت در لایه خارجی جریان است. دلیل این امر فقدان مقدار مناسب سرعت در لایه داخلی جریان نزدیک بستر گزارش شده است.

Nelson (1993) تنش رینولدز را روی 5 تلماسه ثابت دو بعدی، با به کار بردن LDV اندازه‌گیری کرده است. تلماسه‌ها از جنس سیمان با زاویه ایستایی 30 درجه ساخته شده‌اند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها وجود تقابل قوی بین لایه مرزی داخلی و برخاستگی‌های بیش از حد تولید شده توسط ناحیه جدایی جریان در پایین‌دست قله شکل بستر را نشان داده است.

Bennett and Best (1995) به مطالعه جزئیات ساختار

این فرایند، بستر هموار به بستر شکنجی تبدیل می‌گردد (Bennett and Bes, 1995). شکنج‌ها اغلب به صورت دوبعدی با قله‌های گسترده و طولانی و عمود بر خطوط جریان هستند. این شکل‌های کوچک، ارتفاعی کمتر از 0/3 متر داشته و در سرعت‌هایی خیلی کمتر از سرعت متوسط جریان به پایین‌دست حرکت می‌کنند (Dingman, 1984). شکنج‌ها در اندازه ذرات بزرگتر از 0/15 میلی‌متر شکل گرفته و به صورت چشم‌گیری با افزایش انتقال رسوب، ارتفاع، طول موج و سرعت مهاجرت آنها افزایش می‌یابد. همانگونه که سرعت جریان افزایش می‌یابد، با آمیختگی شکنج‌های با ارتفاع و سرعت متفاوت، یک شکل بستر با ارتفاع بزرگتر از شکنج‌های دیگر به وجود می‌آید. در این حالت، انتقال سریع شکنج به تلماسه اتفاق می‌افتد که وابسته به شکل‌گیری شکنجی معروف به «Rouge ripple» می‌باشد (Leeder, 1983). این انتقال در اثر تغییرات مورفولوژی که در زیر شرح داده شده است صورت می‌گیرد: (1) افزایش در ارتفاع و طول شکل بستر (2) وجود مقدار بیشینه ارتفاع و طول موج شکنج نسبت به عمق جریان قبل از انتقال و (3) افزایش حرکت شکل بستر و سرعت انتقال بار بستر در نتیجه افزایش تدریجی ارتفاع شکل بستر (Shiono and Feng, 2003). این شکل بستر با ارتفاع بزرگتر، با افزایش شدت‌های آشفتگی و بنابراین تنش‌های رینولدز در نزدیک ناحیه پیوست مجدد، روی ساختار جریان تأثیر می‌گذارد. «Rouge ripple» باعث تولید بیشتر آشفتگی در وجه پایین‌دست و در نتیجه دبی زیاد رسوب در پایین‌دست می‌گردد. در نتیجه این امر، فرسایش و سرعت انتقال رسوب به پایین‌دست افزایش می‌یابد.

با انتقال شکنج به تلماسه و پایه‌گذاری شکل بستر بزرگتر، این فرآیند ادامه داشته تا با افزایش مقدار آشفتگی، به خصوص در نقطه پیوست مجدد، فرسایش فزونی یافته و سبب تجمع رسوبات در قله شکل بستر گردد. این عمل تا هنگامی که تلماسه‌ها با عمق جریان، سرعت انتقال و تنش برشی به کار برده شده، به تعادل برسند ادامه می‌یابد (Bennett and Best, 1995). تلماسه‌ها براساس شکل‌شان به دو دسته عمده طبقه‌بندی می‌شوند:

- دو بعدی (2D)، در سرعت‌های پایین‌تر اتفاق می‌افتد.

آشفتگی و توزیع سرعت جریان روی 7 تلماسه ثابت دوبعدی از جنس سیمان به طول موج 0/6 و ارتفاع 0/4 متر با زاویه ایستایی 30 درجه در پایین دست پرداختند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که:

- سرعت‌های متوسط زمانی افقی و عمودی با مطالعات پیشین چه بر بستر ثابت و چه بر بستر متحرک مطابقت داشته است.

- بیشینه جذر میانگین متوسط نوسانات سرعت در جهت افقی جریان دقیقاً در پایین دست نقطه بازگشت مجدد و داخل محدوده جدایی جریان اتفاق می‌افتد.

- بیشینه جذر میانگین متوسط نوسانات سرعت در جهت عمود بر جریان در داخل و بالای محدوده جدایی جریان، در راستای لایه برشی اتفاق می‌افتد.

- بزرگترین تنش برشی در داخل محدوده جدایی جریان و در راستای لایه برشی قرار دارد.

- بزرگترین سرعت افقی قبل از قله و روی آن اتفاق افتاده، در حالی که میانگین زمانی سرعت‌های قائم روی قله تقریباً نزدیک صفر است.

(Venditti and Bennett (2000 آزمایش‌هایی برای اندازه‌گیری نوسانات آشفتگی به صورت توزیع سرعت و غلظت بار معلق روی تلماسه‌های دوبعدی انجام دادند.

برای بررسی تقابل بین دو تلماسه تحت شرایط انتقال اندک رسوب در یک فلوم آزمایشگاهی، Jerolmack and Mohring (2005) آزمایش‌هایی روی بستر ثابت با طول موج 0/395 و ارتفاع 0/07 متر و زاویه وجه بالادست 13 درجه انجام دادند. نتایج زیر از آزمایش‌های آن‌ها به دست آمده است:

کاهش ارتفاع تلماسه نسبت به زمان، در تمام آزمایش‌ها مشاهده شده است. همچنین تغییر ارتفاع تلماسه نسبت به زمان مستقل از اندازه قطر ذرات می‌باشد. از دیگر مشاهدات این آزمایش، تغییر در تعداد شکل‌های بستر نسبت به زمان است. این مورد در سری آزمایش‌های دوم و سوم با ذرات ریزدانه، کاملاً مشهود بود. در این گونه شرایط، طول موج تلماسه تا حدود 44% کاهش یافته و تعداد شکل‌های بستر افزایش یافته است. این در حالی است که در همین شرایط (سری دوم و سوم) با استفاده از

ذرات درشت دانه، طول موج تلماسه تا 40% افزایش یافته و تعداد شکل‌های بستر، ثابت باقی می‌ماند. در نتیجه، افزایش در اندازه قطر ذرات باعث متوقف کردن تولید شکل‌های بستر بیشتر نسبت به زمان می‌شود.

(Venditti (2007 به مقایسه ساختار جریان روی شکل‌های بستر دوبعدی و سه‌بعدی پرداخته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که محاسبه مقاومت جریان در کانال‌های باز به بررسی شکل تاج تلماسه نیاز دارد.

تأثیر زبری کف روی سری تلماسه‌های دوبعدی نامتقارن توسط (Ojha and Mazumder (2008 بررسی شده است. به طور کلی 12 تلماسه دوبعدی مصنوعی با استفاده از نوعی پلاستیک ساخته شده و در کف فلوم قرار داده شده است.

(Mazumder et al. (2009 در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تفاوت ساختار جریان روی شکل‌های بستر متقارن و نامتقارن پرداخته‌اند. دو شکل بستر مثلی با ارتفاع و طول موج برابر و یکی دارای اضلاع نامساوی و دیگری متساوی‌الساقین در این آزمایشات کار برده شده است. نتایج نشان داده است که در ساختار جریان بین دو شکل بستر، تفاوت‌های قابل توجهی وجود دارد که به هندسه متفاوت آن‌ها نسبت داده شده است. تفاوت در اندازه ناحیه جدایی جریان، تفاوت قابل توجهی در ساختارهای جریان متوسط و آشفتگی به وجود آورده است.

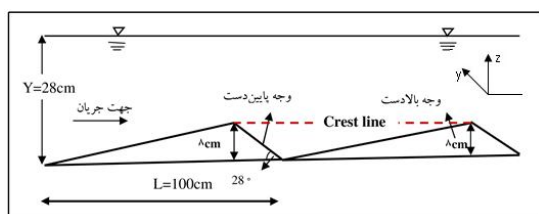
(Nasiri Dehsorkhi et al. (2010 اثر شکل بسترهای مختلف با تغییر زاویه وجه بالادست و پوشش گیاهی دیواره را روی سرعت جریان، تنش رینولدز و شدت‌های آشفتگی بررسی کرده‌اند. در این تحقیق، اثر فاصله از پوشش گیاهی روی توزیع‌های سرعت، تنش رینولدز و شدت آشفتگی، اثر زوایای مختلف وجه بالادست روی خصوصیات جریان در کانال پوشیده شده و نقاط بازگشت برای زوایای مختلف وجه بالادست بررسی شده است.

(Xie et al (2014 مدل LES را برای جریان‌های آزاد سطحی در توپوگرافی‌های پیچیده برای فهم بهتر برهم-کنش آشفتگی تولید شده در تلماسه و دینامیک سطح آزاد توسعه داده‌اند.

(Mohajeri et al. (2015 مطالعه آزمایشگاهی برای بررسی

صورت تصادفی 100 ذره برداشته شد و قطر میانه آن‌ها با استفاده از کولیس و ترسیم منحنی دانه‌بندی، به دست آمد. طول تلماسه‌ها یک متر، ارتفاع متوسط تلماسه‌ها 8 و 4 سانتی‌متر و شیب بالادست آن‌ها 28 درجه می‌باشد. تعداد ده تلماسه از 8 متری تا 18 متری کانال تعبیه شده است (شکل 2). انتخاب ابعاد تلماسه با توجه به تحقیق صورت گرفته توسط Carling (1999) و Allen (1985) انتخاب توجه به مقاله Guy (1966) و گردیده‌اند.

برای شبیه‌سازی بستر آزمایش با آبراهه‌های طبیعی از ساقه‌های برنج در یک طول 10 متری در دو طرف فلوم استفاده شده است (شکل 3). تراکم ساقه‌ها در هر متر بیشتر از 400 عدد می‌باشد. این تراکم با توجه به تراکم پوشش گیاهی در آبراهه‌های طبیعی انتخاب شده است. ارتفاع ساقه‌های برنج به گونه‌ای است که در تمام آزمایش‌ها، از سطح آب بیرون آمده‌اند. برای تعیین قطر متوسط ساقه‌ها، تعداد 20 نمونه تصادفی از ساقه‌های برنج انتخاب و به وسیله کولیس قطر آن‌ها اندازه‌گیری شد. متوسط قطر آن‌ها 2/7 میلی‌متر به دست آمد.



شکل 2 شماتیک تلماسه‌های مورد استفاده



شکل 3 پوشش گیاهی استفاده شده در دیواره کانال

ساختار جریان روی بستر شنی ثابت در یک کانال باز با تمرکز روی ناحیه نزدیک بستر انجام داده‌اند. ساختار جریان تولید شده بالای تلماسه‌ها روی مقاومت جریان، انتقال رسوب و شکل‌گیری سیستم‌های آبرفتی مؤثر است. بنابراین بررسی اثر شکل هندسی تلماسه به منظور بررسی خصوصیات جریان لازم است. موضوع این مطالعه جمع‌آوری اطلاعات سرعت، شدت آشفتگی و تنش رینولدز روی تلماسه‌های مصنوعی ثابت با تغییر ارتفاع تاج تلماسه در یک کانال آزمایشگاهی با دیواره‌های پوشیده شده می‌باشد.

2- مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌های تحقیق مورد نظر از کانال موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب 20، 0/6 و 0/6 متر استفاده شده است. تمامی آزمایش‌ها در شرایط شبه یکنواخت انجام گرفته است. این کانال به وسیله یک پمپ با حداکثر دبی 75 لیتر در ثانیه تغذیه می‌شود. آب پس از ورود به یک حوضچه آرامش و عبور از صافی‌ها وارد کانال شده و در هنگام خروج از کانال وارد حوضچه آرامش می‌گردد. بعد از عبور از یک مجرای زیرزمینی وارد یک مخزن بزرگ می‌شود که محل جمع‌آوری آب برای تغذیه کانال است.

برای اندازه‌گیری عمق آب از یک عمق‌سنج استفاده گردید. این عمق‌سنج از یک کولیس با دقت 0/01 سانتی‌متر تشکیل شده است که انتهای آن (محل برخورد با سطح آب)، برای افزایش دقت بصورت نوک تیز می‌باشد. قطر شن مورد استفاده برای ساخت تلماسه‌ها با توجه به اینکه آستانه حرکت آن‌ها نباید از سرعت جریان بیشتر باشد، انتخاب شد. ذرات شن با قطر متوسط 14 میلی‌متر بر اساس شرایط هیدرولیکی انتخاب شده‌اند. دانه‌های شن مورد نظر از الک عبور داده شد تا شن با اندازه دلخواه به دست آید. سپس برای حصول اطمینان از دانه‌بندی دلخواه با استفاده از روش ولمن قطر متوسط ذرات شن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور در سه قسمت روی تلماسه بعد از ساخت (قسمت ابتدایی وجه بالادست، قسمت انتهایی وجه بالادست و روی وجه پایین‌دست) به

دست منتقل نمی‌شوند. این منطقه همان منطقه جدایی ذکر شده است. با حرکت به سمت سطح آب و عبور از لایه برشی تغییرات سرعت تقریباً یکنواخت می‌شوند. این مسئله به علت عدم تأثیر شکل بستر بر ساختار جریان در اعماق نزدیک به سطح آب می‌باشد. ناحیه برخاستگی روی ناحیه جدایی جریان گسترده و به سمت پایین دست گسترش یافته است. (Nasiri Dehsorkhi et al (2010)

ناحیه برخاستگی را در زیر لایه خارجی و دور از بستر گزارش کرده‌اند. همان‌طور که از شکل 4 پیداست بیشینه سرعت روی سطح تلماسه دقیقاً بعد از تاج رخ می‌دهد.

الگوی سرعت روی این تلماسه‌ها مشابه الگوهای ارائه شده توسط (Bennett and Best (1995 و (Nasiri Dehsorkhi et al. (2010 و (Kostaschuk (2002 می‌باشد. ناحیه‌ای مشخص از نقصان اندازه حرکت در جریان روی تلماسه‌ها توسط برخی محققان گزارش شده است که ناشی از جدایی جریان و تشکیل ناحیه برخاستگی در پایین دست تاج تلماسه می‌باشد (Bennett and Best, 1995 و (Nelson, 1993). زمانی که ناحیه برخاستگی به پایین دست گسترش می‌یابد، تأثیر نقصان اندازه حرکت به سمت خارج منتشر شده است و این ناحیه را وادار به گسترش در عمق می‌کند. این نواحی با توجه به یافته‌های (Best and Kostaschuk (2002 در اثر پوشش گیاهی دیواره‌ها در مطالعات آزمایشگاهی تا سطح آب گسترده نمی‌شوند. در بخش فرورفته تلماسه سرعت در راستای جریان در ناحیه جدایی منفی می‌شود. سرعت‌های منفی در راستای جریان به $1/5$ - برابر سرعت متوسط رسیده است. لایه برشی جدا گشته و ناحیه گردشی به واسطه گرادیان شدید سرعت و سرعت‌های منفی در راستای جریان و عمود بر آن مشخص شده است. این در حالی است که مقادیر سرعت منفی در نتایج بدست آمده توسط (Nasiri Dehsorkhi (2010 برابر با $0/06$ - سرعت متوسط می‌باشد. طول ناحیه جدایی جریان (L) از جایی که جریان جدا شده است، یعنی در وجه پایین دست تلماسه اول تا نقطه پیوست مجدد جریان اندازه‌گیری شده است. این نقطه به عنوان محل تشکیل نوسانات آشفتگی زیاد، شناخته می‌شود. نقطه پیوست مجدد با مشاهده سرعت-

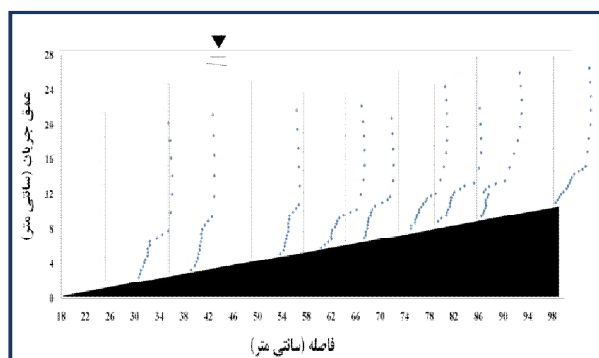
برای اندازه‌گیری سرعت‌های نقطه‌ای از دستگاه Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) با فراوانی نمونه‌گیری 200 هرتز استفاده شده است. پروفیل‌های سرعت از تاج تلماسه پنجم تا تاج تلماسه ششم در 14 مقطع اندازه‌گیری شده‌اند. سرعت و عمق جریان در تمام آزمایش‌ها ثابت و به ترتیب برابر $0/24$ متر بر ثانیه و $0/28$ متر بوده است. پروفیل‌های سرعت شامل 20 تا 30 نقطه جهت داده‌برداری بوده و اولین نقطه اندازه‌گیری شده در 3 میلی‌متری نزدیک بستر کانال قرار دارد. در مجموع دو سری آزمایش انجام شده است. سری اول تلماسه با تاج $0/04$ متر و سری دوم تلماسه با تاج $0/08$ متر می‌باشد.

3- نتیجه و بحث

به منظور بررسی اثر ارتفاع تاج تلماسه بر ساختار جریان، دو سری آزمایش انجام شده است. تفاوت سری اول و سری دوم در ارتفاع تاج تلماسه بوده، به طوری که در سری اول ارتفاع تاج $0/08$ متر و در سری دوم $0/04$ متر در نظر گرفته شد.

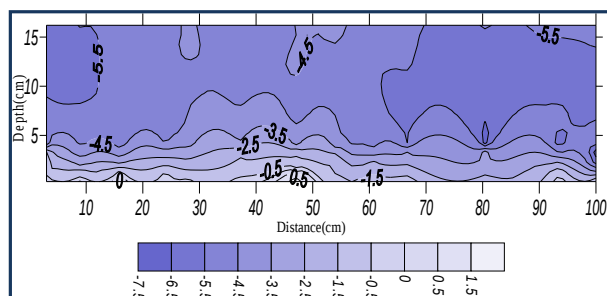
3-1- توزیع سرعت

نیمرخ‌های سرعت در راستای جریان در محور مرکزی کانال بر طول تلماسه با ارتفاع $0/08$ متر در شکل 4 نشان داده شده‌اند. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد جریان نزدیکی بخش فرورفته تلماسه جدا شده و در نقطه‌ای روی وجه بالادست در تلماسه بعدی به بستر باز می‌گردد. این جدایی جریان و بازگشت مجدد آن روی تلماسه یک گرادیان فشار مثبت تولید می‌کند که منجر به گرادیان سرعت کوچکتر و کاهش سرعت نزدیک بستر می‌گردد. گرادیان سرعت روی سطح تلماسه در پایین دست بخش فرو رفته، به تدریج افزایش می‌یابد و روی تاج تلماسه به حداکثر مقدار خود می‌رسد. کاهش سرعت در حضور گرادیان فشار مثبت در شکل قابل مشاهده است. با توجه به شکل 4 هنگامی که آب به بالای شکل بستر می‌رسد، به سمت پایین دست حرکت می‌کند. بنابراین گردابه‌ها در پشت شکل بستر باقی مانده و جریان به صورت مداوم شروع به گردش می‌کند. در نتیجه این گردابه‌ها به پایین-

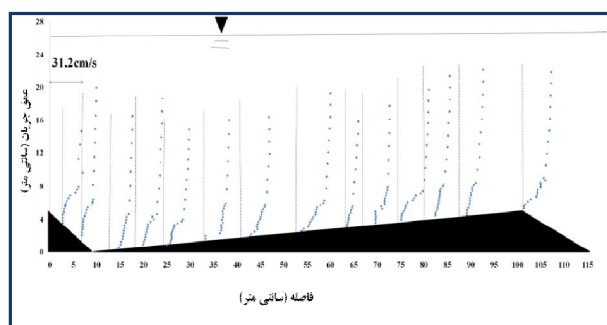


ج - وجه بالادست تلماسه با تاج 8 سانتی متر
شکل 5 نیمرخ سرعت در راستای جریان (cm/s)

میانگین سرعت قائم در همه قسمت‌ها منفی می‌باشد. در پژوهش‌های (Nasiri Dehsorkhi (2010) مقادیر مثبت سرعت عمودی در ناحیه جدایی جریان مشاهده شده و نشان دهنده الگوی چرخشی قوی می‌باشد. شکل 7 نیمرخ‌های سرعت در راستای جریان روی تلماسه با ارتفاع 4 سانتی‌متر را نشان می‌دهد. نیمرخ‌های سرعت در دو قله متوالی فقط در نقطه‌ای نزدیک بستر هم‌شکل نیستند (شکل 8).



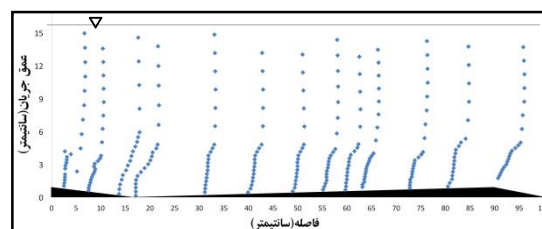
شکل 6 منحنی‌های هم‌سرعت در راستای عمود بر جریان (cm/s)
روی تلماسه با تاج 8 سانتی‌متر



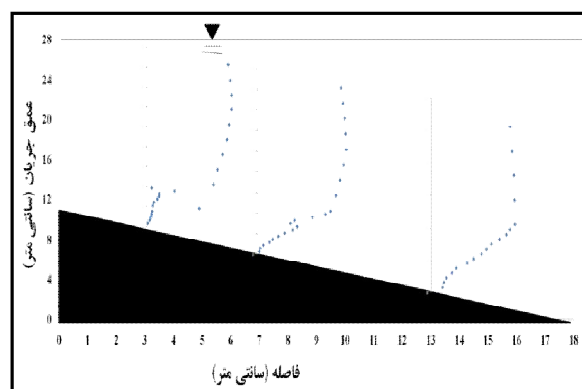
شکل 7 نیمرخ‌های سرعت (cm/s) در راستای جریان در طول
تلماسه با ارتفاع تاج 4 سانتی‌متر

های افقی در وجه پایین‌دست تلماسه تعیین می‌شود و در محل تغییر علامت سرعت افقی از بالادست به پایین‌دست قرار دارد. جریان در 0/18 متری تاج از بستر جدا شده و در 0/24 متری آن که حدود $3\Delta d$ (ارتفاع تلماسه) می‌باشد، دوباره به بستر باز می‌گردد (شکل 5). Nasiri Dehsorkhi et al. (2010) در پژوهش‌های خود این مقدار را $3/8 \Delta d$ به دست آورده‌اند.

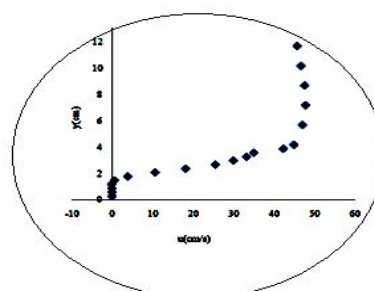
در شکل 6 منحنی‌های هم‌سرعت در راستای قائم مشاهده می‌شود. بیشینه سرعت عمودی برابر 0/0244 سانتی‌متر بر ثانیه در وجه بالادست تلماسه مشاهده شده است. سرعت‌های مثبت در وجه بالادست تلماسه در نقاط نزدیک به بستر، نزدیک به صفر می‌باشند.



شکل 4 نیمرخ‌های سرعت در راستای جریان روی تلماسه
با ارتفاع 8 سانتی‌متر

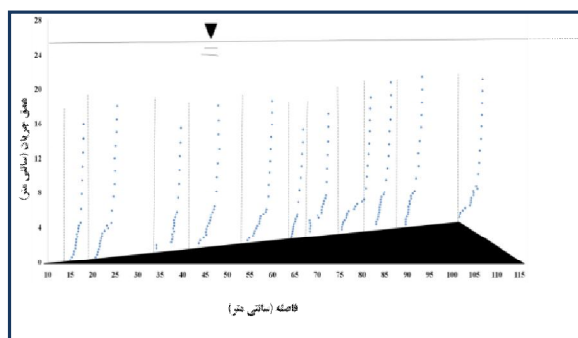


الف - وجه پایین‌دست

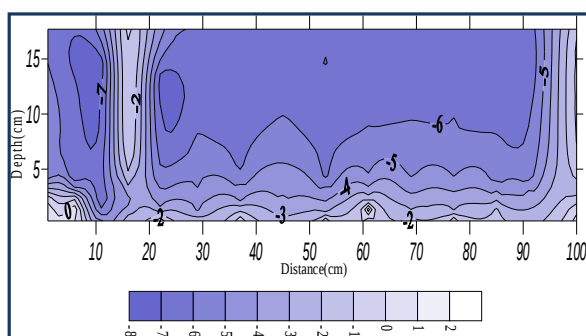


ب - بخش فرو رفته (محل رخداد سرعت منفی)

دورتری از محل جدایی جریان قرار دارد و در فاصله $3\Delta d$ و $0/11\Delta d$ از قله به ترتیب برای ارتفاع 8 و 4 سانتی‌متر قرار گرفته است. شکل 9 نیمرخ‌های سرعت در وجه بالادست تلماسه در سری دوم را نشان می‌دهد. افزایش ارتفاع تاج تلماسه از 4 به 8 سانتی‌متر باعث افزایش سرعت بیشینه گردیده و منجر به تغییر محل وقوع آن شده است. با توجه به نسبت ظرافت کمتر از 5 و حضور پوشش گیاهی بر دیواره فلوم، جریان سه بعدی بوده و همان‌طور که انتظار می‌رود در هر دو ارتفاع، بیشینه سرعت جریان در زیر سطح آب و در عمق نسبی $0/62$ رخ داده است. منحنی‌های هم‌سرعت در راستای قائم در شکل 10 آورده شده است.

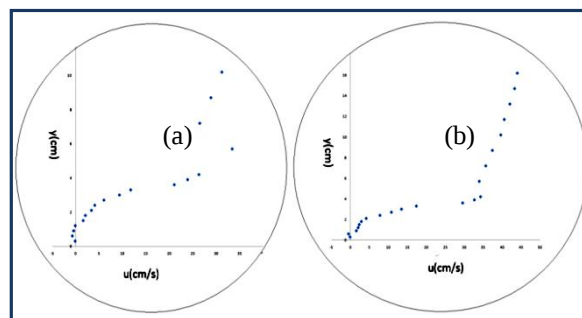


شکل 9 نیمرخ سرعت (cm/s) در راستای جریان روی وجه بالادست تلماسه با تاج 4 سانتی‌متر



شکل 10 منحنی هم‌سرعت در راستای عمود بر جریان w (cm/s) در تلماسه با تاج 4 سانتی‌متر

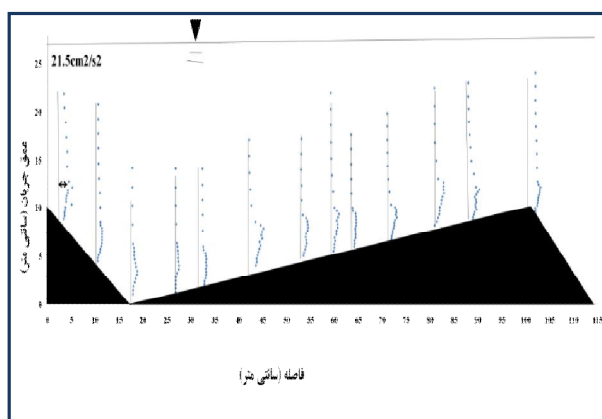
بیشینه سرعت عمودی $0/0186$ متر بر ثانیه در نقطه‌ای واقع بر وجه بالادست تلماسه رخ داده است. در ناحیه جدایی جریان سرعت‌های عمودی مثبت می‌باشند که



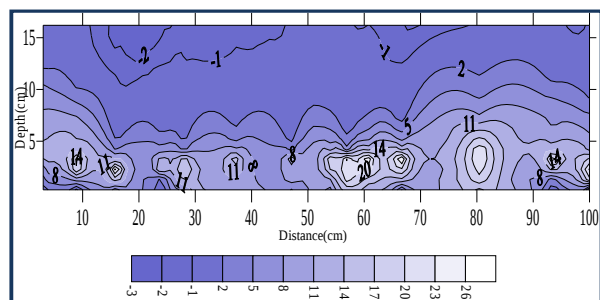
شکل 8 نیمرخ سرعت (cm/s) در راستای جریان روی وجه پایین‌دست (a) در فاصله 3 سانتی‌متر از تاج تلماسه (b) در فاصله 8 سانتی‌متر از تاج تلماسه با ارتفاع 4 سانتی‌متر

با توجه به نظر Bennett and Best, (1995) و Venditti and Bennett (2000) جریان در این سری نسبتاً متعادل است. همان‌طور که از شکل پیداست منطقه‌ی با سرعت کندشونده نشان‌دهنده ناحیه برخاستگی و ناحیه بالایی نیمرخ‌ها با سرعت تقریباً ثابت نشان‌دهنده ناحیه خارجی جریان است. خصوصیات جریان روی تلماسه‌ها مانند جدایی جریان و نقطه پیوست مجدد در نقطه‌ای در پایین‌دست، روی وجه بالادست و سرعت‌های منفی در ناحیه جدایی جریان در تلماسه‌ها با ارتفاع تاج 4 سانتی‌متر نیز مشاهده می‌شود. جریان متناوب برگشتی و جریان کندشونده، سبب تولید گرادیان‌های عمودی در سرعت‌های افقی گشته که این امر باعث شکل‌گیری لایه برشی در نتیجه اختلاف سرعت می‌گردد. جدایی جریان در وجه پایین‌دست همراه با نقطه پیوست مجدد در $0/11$ متری تاج تلماسه اتفاق افتاده است. مقادیر سرعت منفی در راستای جریان به $0/07$ سرعت متوسط می‌رسند. این پارامتر در راستای جریان روی تلماسه با ارتفاع تاج 4 سانتی‌متر بیشتر از مقادیر آن روی تلماسه با ارتفاع تاج 8 سانتی‌متر می‌باشند. بیشینه سرعت جریان برابر $0/44$ متر بر ثانیه در نزدیکی بخش فرورفته و در وجه بالادست اتفاق افتاده است. سرعت‌های منفی همان‌گونه که در شکل‌های 7 و 8 مشخص است در نزدیکی تاج تلماسه مشاهده شده است. مقایسه شکل‌های 4 و 7 نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع تاج تلماسه از 4 سانتی‌متر به 8 سانتی‌متر، ناحیه جدایی جریان را از نزدیکی تاج تلماسه با ارتفاع 4 سانتی‌متر به نزدیکی بخش فرورفته انتقال می‌دهد. همچنین نقطه پیوست مجدد با افزایش ارتفاع تاج تلماسه در فاصله

(2000) تطابق دارد. بیشینه مقدار تنش در مطالعه حاضر در $0/74\lambda$ (طول موج تلماسه) قرار گرفته است. Bennett and Best (1995) آن را در $0/5\lambda$ و Nasiri et al. (2010) در $0/3\lambda$ مشاهده نموده‌اند. (1995) وجود تنش‌های منفی را تعیین کننده تقابل جریان به سمت داخل¹ و به سمت خارج² دانسته‌اند. این در حالی است که تنش‌های مثبت وجود پدیده‌هایی مانند حرکات پرتابی و حرکات جارویی را بیان می‌کنند.



شکل 11. نیمرخ‌های تنش رینولدز τ (cm²/s²) در طول تلماسه با ارتفاع 8 سانتی‌متر



شکل 12. منحنی‌های هم‌تراز توزیع تنش رینولدز τ (cm²/s²) روی تلماسه با تاج 8 سانتی‌متر

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود تنش‌های منفی بزرگ نزدیک سطح آب و نزدیک بخش فرورفته ناشی از این تقابل بوده و تنش‌های مثبت بزرگ در نزدیکی بستر نیز حرکات پرتابی و جارویی را ایجاد می‌کند. ساختار این حرکات به گونه‌ای است که باعث تولید تنش‌های بزرگ

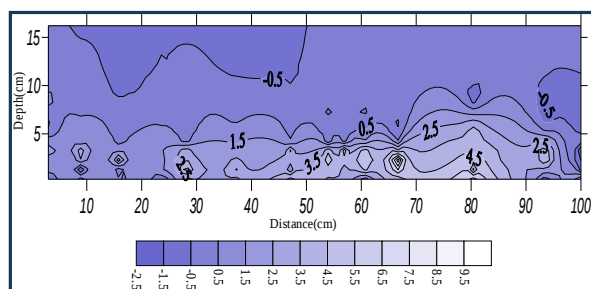
نشان دهنده الگوی چرخشی قوی می‌باشد. میانگین سرعت قائم در تاج تلماسه و نزدیک آن مثبت و در بقیه نواحی منفی می‌باشد. سرعت عمودی در تلماسه با ارتفاع تاج 4 سانتی‌متر، در محل جدایی جریان مثبت بوده و با افزایش ارتفاع تاج تلماسه به 8 سانتی‌متر، مقادیر مثبت در پایین‌دست ناحیه جدایی جریان، در منطقه برخاستگی روی وجه بالادست تلماسه، قرار دارند.

3-2- تنش رینولدز

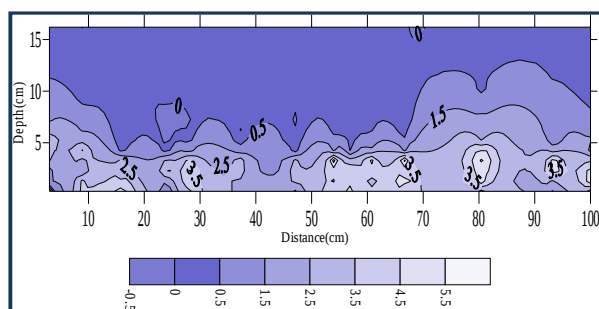
شکل 11 توزیع تنش برشی رینولدز را در طول تلماسه با ارتفاع 8 سانتی‌متر و در محور مرکزی کانال نشان داده است. شکل 12 منحنی‌های هم‌تراز تنش‌های رینولدز روی تلماسه با ارتفاع 8 سانتی‌متر را نشان می‌دهد. در ناحیه برخاستگی نزدیک بستر، تنش برشی رینولدز از بستر کانال افزایش می‌یابد. سپس نزدیک مرکز ناحیه برخاستگی به حداکثر مقدار خود می‌رسد و پس از آن تا مقادیر منفی نزدیک سطح آب کاهش می‌یابد. مقادیر منفی و تقریباً صفر نزدیک سطح آب نشان دهنده برش بسیار کم در این منطقه و تأثیر سطح آزاد می‌باشد. این مسئله به این معناست که تنش برشی در لایه‌ای نزدیک سطح آب حداقل است و هندسه تلماسه نتوانسته است تا این لایه، سطح آزاد آب را تحت تأثیر قرار دهد. Nelson et al. (1993) و Bennett and Best (1995) نیز چنین توزیعی را ارائه نموده‌اند. مقدار بیشینه تنش برشی رینولدز در وجه بالادست، نزدیک قله افتاده است. این مقدار از بستر دور بوده و نقشی در حمل رسوب ندارد. همچنین مشاهده می‌شود با جلو رفتن در وجه بالادست و عریض و کم قدرت شدن ناحیه برخاستگی، مقادیر بیشینه تنش رینولدز به سمت سطح آب کشیده می‌شوند.

مقادیر بزرگ تنش روی وجه بالادست تلماسه و در طول لایه برشی گسترده شده‌اند. بیشینه تنش برشی در پایین‌دست نقطه پیوست مجدد رخ داده است. این مقدار در عمق نسبی $y/h=0/23$ قرار دارد. این نتیجه با نتایج حاصل از تحقیقات (Van Mierlo and de Ruiter (1998)، (McLean (1993)، (Nelson et al. (1993)، (Lyn (1993)، (Venditti and Bennett، (Bennett and Best (1995)

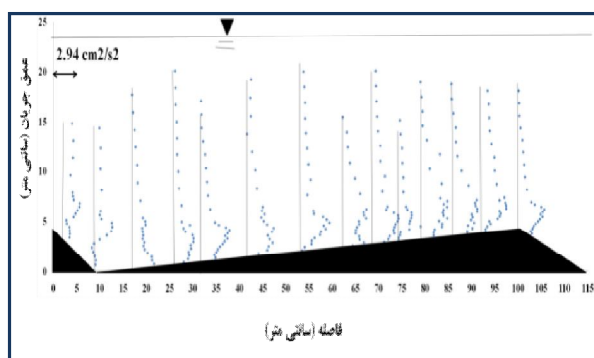
1. Inward
2. Outward



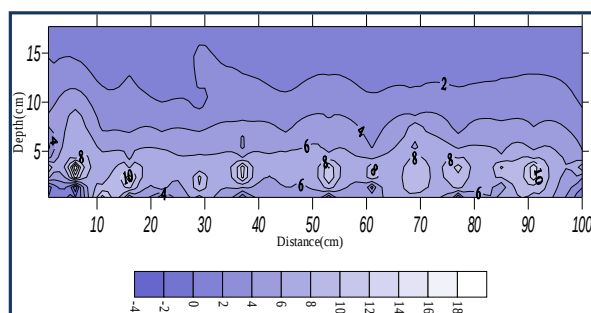
شکل 13 توزیع تنش رینولدز τ_{uv} (cm²/s²) روی تلماسه با تاج 8 سانتی متر به صورت منحنی های هم تنش



شکل 14 توزیع تنش رینولدز τ_{vw} (cm²/s²) روی تلماسه با تاج 8 سانتی متر به صورت منحنی های هم تنش



شکل 15 نیمرخ های تنش برشی τ_{uw} (cm²/s²) روی تلماسه با ارتفاع 4 سانتی متر



شکل 16 منحنی هم تراز توزیع تنش رینولدز τ_{uw} (cm²/s²) در تلماسه با تاج 4 سانتی متر

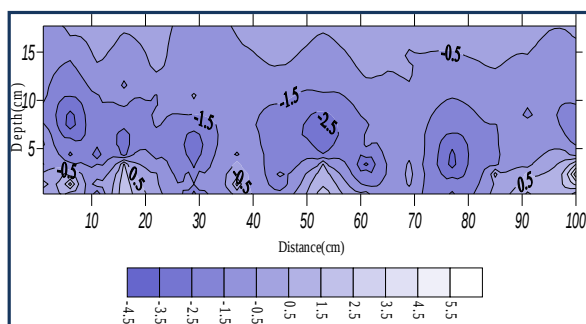
رینولدز می شوند.

همان گونه که از شکل 13 مشخص است مقادیر تنش τ_{uv} در ناحیه برخاستگی مثبت و نزدیک سطح آب منفی بوده است بررسی مقادیر تنش τ_{vw} در شکل 14 نشان می دهد که این مقادیر در سراسر طول تلماسه مثبت می باشند. سهم ناچیزی از تعادل اندازه حرکت توسط τ_{uv} و τ_{vw} فراهم می شود.

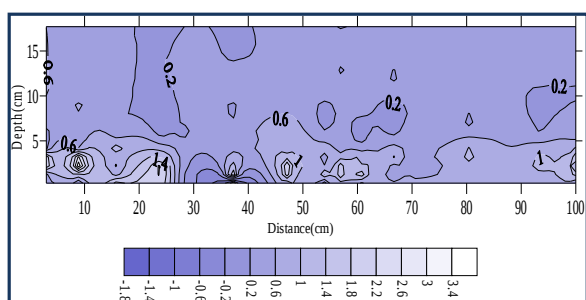
شکل 15 نشان می دهد که محل وقوع حداکثر تنش برشی رینولدز روی تلماسه با ارتفاع 4 سانتی متر در طول ناحیه برخاستگی مشابه با محل وقوع کمترین مقادیر سرعت می باشد. همان طور که مشاهده می شود با حرکت به سمت وجه بالادست عرض ناحیه برخاستگی زیادتر شده و مقادیر بیشینه تنش رینولدز به سمت سطح آب کشیده می شوند. در ناحیه برخاستگی نزدیک بستر، تنش برشی رینولدز افزایش یافته است. سپس نزدیک مرکز ناحیه برخاستگی به بیشینه مقدار خود می رسد و تا سطح آب کاهش می یابد. (Bennett and Best, Nelson et al. (1993), (1995) Stoesser et و Venditti and Bennett (2000) و al. (2008) نیز چنین توزیعی را ارائه داده اند

در شکل 16 منحنی های هم تراز تنش رینولدز روی تلماسه با ارتفاع 4 سانتی متر نشان داده شده است. مقادیر بزرگ تنش در وجه بالادست تلماسه و در پایین دست ناحیه جدایی جریان در طول لایه برشی گسترده شده اند. محل وقوع بیشینه تنش در عمق نسبی $y/h=0/16$ می باشد. در این مطالعه بیشینه مقدار تنش رینولدز در ناحیه جدایی جریان و در $0/1$ طول موج تلماسه دیده شده است که متفاوت با یافته های (Bennett and Best (1995) که آن را در نصف طول موج تلماسه مشاهده نموده اند، می باشد.

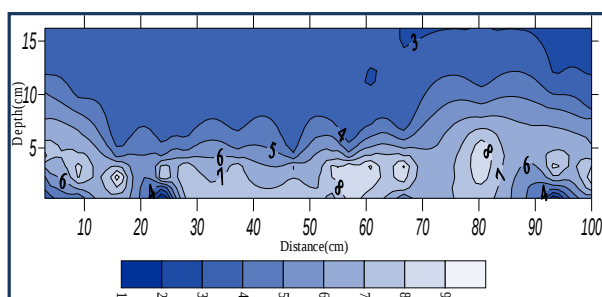
در هر دو ارتفاع تاج تلماسه، بیشینه تنش برشی در پایین دست نقطه پیوست مجدد رخ داده است. این مقدار در تلماسه با ارتفاع تاج 8 سانتی متر در عمق نسبی $y/h=0/23$ و در تلماسه با ارتفاع تاج 4 سانتی متر در عمق نسبی $y/h=0/16$ قرار دارد. بنابراین با افزایش ارتفاع تاج تلماسه مقدار بیشینه تنش در فاصله دورتری از بستر اتفاق می افتد. مقادیر تنش رینولدز با افزایش ارتفاع تاج تلماسه در نقاط مختلف رفتارهای متفاوتی دارند.



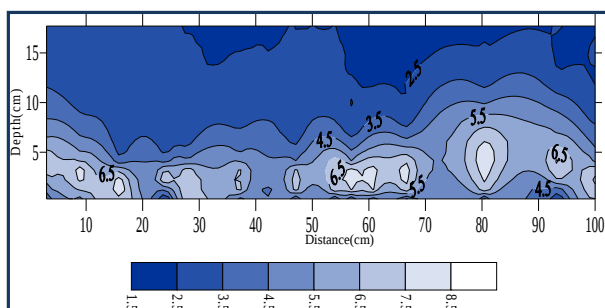
شکل 17 توزیع تنش رینولدز τ_{uv} (cm²/s²) به صورت منحنی هم‌تنش در تلماسه با تاج 4 سانتی‌متر



شکل 18 توزیع تنش رینولدز τ_{vw} (cm²/s²) به صورت منحنی‌های هم‌تنش در تلماسه با تاج 4 سانتی‌متر



شکل 19 توزیع نوسانات سرعت در راستای جریان u_{rms} (cm/s) در تلماسه با تاج 8 سانتی‌متر



شکل 20 توزیع نوسانات سرعت در راستای عرضی v_{rms} (cm/s) در تلماسه با تاج 8 سانتی‌متر

نوسانات سرعت در راستای عرضی جریان روی تلماسه با

بدین صورت که این مقادیر در نیمرخ سوم نزدیک بخش فرورفته در بستر کانال در ارتفاع 4 سانتی‌متری تاج تلماسه بیشتر از ارتفاع تاج 8 سانتی‌متر بوده و با حرکت به سمت وجه بالادست، افزایش تنش رینولدز با کاهش ارتفاع تاج تلماسه در نقاط میانی سطح مقطع مشاهده شده است. سپس در نقاط نزدیک تاج تلماسه این روند از بستر کانال تا نزدیکی سطح آب ادامه یافته است.

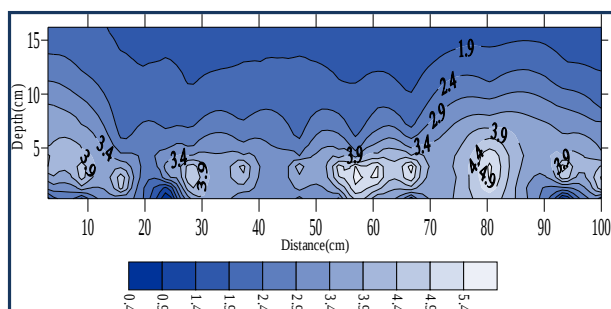
با مشاهده تنش τ_{uv} در شکل 17 مشخص می‌گردد که مقادیر این تنش همه‌جا منفی بوده و هرچه به سمت بستر نزدیک‌تر شده، مقادیر تنش منفی‌تر شده‌اند. در ناحیه جدایی جریان و در وجه بالادست نزدیک تاج تلماسه در نقاط نزدیک بستر تنش τ_{uv} مثبت می‌باشد. بیشینه مقدار آن بر وجه بالادست در بالای ناحیه جدایی جریان قرار گرفته است. افزایش ارتفاع تاج تلماسه سبب افزایش مقادیر تنش در راستای عرضی در سراسر طول تلماسه گردیده است. تنش τ_{vw} به جز بعد از بخش فرورفته تلماسه و همچنین نزدیک تاج تلماسه بعدی روی وجه بالادست نزدیک بستر کانال تقریباً همه‌جا مثبت می‌باشد (شکل 18). این در حالی است که با افزایش ارتفاع تاج تلماسه مقادیر تنش در راستای عرضی در همه‌جا، به جز در ناحیه جدایی جریان افزایش یافته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تغییر در ارتفاع تاج تلماسه تغییری در توزیع تنش τ_{uv} و τ_{vw} ایجاد نکرده است.

3-2- شدت آشفتگی

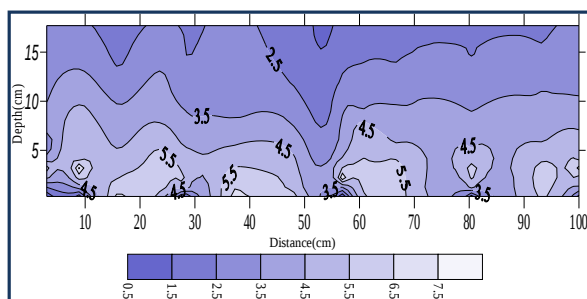
شدت آشفتگی از طریق جذر میانگین مربعات نوسانات سرعت یا RMS نشان داده می‌شود. توزیع نوسانات سرعت در سه راستای افقی، عمودی و عرضی روی تلماسه با ارتفاع 4 سانتی‌متر به ترتیب در شکل‌های 19، 20 و 21 نشان داده شده است. بیشینه شدت آشفتگی در راستای جریان روی تلماسه با ارتفاع 8 سانتی‌متر برابر 0/1 متر بر ثانیه بالای ناحیه جدایی جریان در ناحیه برخاستگی اتفاق افتاده است.

مقادیر بزرگ این نوسانات درون و پایین‌دست ناحیه جدایی جریان شبیه به یک کپسول، قابل مشاهده است. این نتایج مطابق با نتایج (Bennett and Best 1995) می‌باشد.

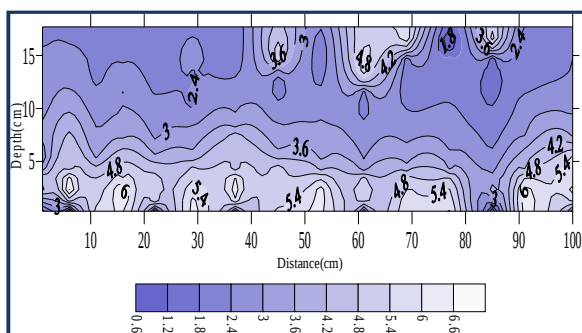
جدایی جریان در ناحیه برخاستگی اتفاق افتاده است.



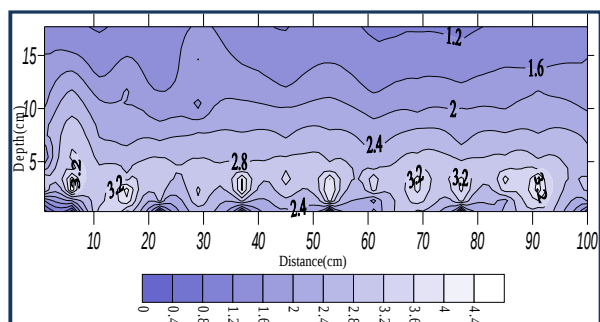
شکل 21 توزیع نوسانات سرعت در راستای عمود بر جریان
در تلماسه با تاج 8 سانتی‌متر



شکل 22 توزیع نوسانات سرعت در راستای جریان $urms$ در
تلماسه با تاج 4 سانتی‌متر



شکل 23 توزیع نوسانات سرعت در راستای عرضی جریان
در تلماسه با تاج 4 سانتی‌متر



شکل 24 توزیع نوسانات سرعت در راستای عمود بر جریان
در تلماسه با تاج 4 سانتی‌متر

ارتفاع 8 سانتی‌متر در شکل 20 دیده می‌شود. بیشینه مقدار آن برابر $0/085$ متر بر ثانیه بوده و در ناحیه جدایی جریان مشاهده شده است. شکل 20 نوسانات سرعت در راستای عمود بر جریان روی تلماسه با ارتفاع 8 سانتی‌متر را نشان می‌دهد. بیشینه مقدار آن برابر $0/06$ متر بر ثانیه در پایین‌دست ناحیه جدایی جریان و در منطقه برخاستگی رخ داده است.

با توجه به شکل 19 مقادیر بزرگ شدت آشفتگی در محلی نزدیک بستر اتفاق افتاده‌اند که این نتیجه با مشاهدات (Bennett و Nasiri Dehsorkhi et al. (2010) and Best (1995) متفاوت است. به طوری که Bennett and Best (1995) از این پدیده چنین نتیجه گرفتند که شکل بستر در ایجاد مقادیر بزرگ نوسانات نقشی نداشته و این مقادیر در ارتباط با پراکندگی گردابه‌ها در طول ناحیه برخاستگی می‌باشد.

الگوی توزیع نوسانات در راستای عرضی و طولی مشابه همدیگر بوده، به گونه‌ای که مقادیر بزرگ نوسانات در منطقه جدایی جریان، لایه مرزی داخلی و ناحیه برخاستگی مشاهده شده‌اند. در راستای عمودی، الگوی توزیع کمی متفاوت می‌باشد، به طوری که مقادیر بزرگ نوسانات در ناحیه برخاستگی و در طول لایه برشی رخ داده‌اند و در نزدیک بستر و همچنین نزدیک سطح آب مقدار نوسانات کمتر می‌باشد.

توزیع شدت آشفتگی روی تلماسه با ارتفاع 4 سانتی‌متر در شکل‌های 22، 23 و 24 نشان داده شده است. بیشینه مقدار نوسانات سرعت در راستای جریان روی تلماسه با ارتفاع 4 سانتی‌متر برابر $0/0898$ متر بر ثانیه می‌باشد. شکل‌های 23 و 24 به ترتیب الگوی توزیع نوسانات سرعت را در راستای عرضی و عمودی جریان نشان می‌دهند. بیشینه مقدار $vrms$ در راستای قائم برابر $0/047$ متر بر ثانیه می‌باشد. این مقدار در ناحیه برخاستگی در بالای منطقه جدایی جریان رخ داده است. بیشینه مقدار $vrms$ برابر $0/071$ متر بر ثانیه است که در محل وقوع حداکثر نوسانات سرعت در راستای قائم مشاهده شده است. بیشینه شدت آشفتگی در راستای جریان روی تلماسه با ارتفاع 8 سانتی‌متر برابر $0/1$ متر بر ثانیه بالای ناحیه

- تغییر در ارتفاع تاج تلماسه تغییری در توزیع تنش τ_{uv} و τ_{uw} ایجاد نکرده است.

- با کاهش ارتفاع تاج تلماسه بیشینه مقدار نوسانات سرعت کاهش و محل وقوع آن تغییر یافته است. بیشینه نوسانات در راستای جریان روی تلماسه با ارتفاع تاج 4 سانتی متر روی وجه بالادست قرار گرفته است، در حالی که این مقدار در تلماسه با ارتفاع 8 سانتی متر در بالای ناحیه جدایی جریان در منطقه برخاستگی اتفاق افتاده است.

5- تقدیر و تشکر

تهیه کنندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از همکاری دانشگاه شهرکرد تشکر کنند.

6- فهرست علائم

L	طول ناحیه جدایی جریان
$urms$	جزر میانگین مربعات نوسانات سرعت در راستای جریان
$-\overline{u'w'}$	تنش رینولدز
$vrms$	جزر میانگین مربعات نوسانات سرعت در راستای عرضی
V	مؤلفه سرعت در راستای عرض جریان
$wrms$	جزر میانگین مربعات نوسانات سرعت در راستای عمود بر جریان
w	مؤلفه سرعت در راستای عمود بر جریان
y/h	نسبت ظرافت
Δd	ارتفاع تلماسه
λ	طول موج تلماسه
τ_0	تنش برشی

7- مراجع

- Allen, J. R. L., (1985). *Principles of physical sedimentology*, Chapman and Hall, New York, 272 pp.
- Ashley, G. M. (1990). "Classification of large-scale subaqueous bed forms: a new look at an old problem", *J. Sediment. Petrol.* Vol. 60, pp. 160-172.
- Bennett, S. J. and Best, J. L. (1995). "Mean flow and turbulence structures over fixed, two-dimensional dunes: Implication for sediment

با کاهش ارتفاع تاج تلماسه‌ها بیشینه مقدار نوسانات سرعت کاهش یافته و برابر 0/0898 متر بر ثانیه می‌باشد.

با کاهش ارتفاع تاج تلماسه محل وقوع بیشینه نوسانات سرعت تغییر می‌کند. روی تلماسه با ارتفاع 4 سانتی متر بیشینه نوسانات روی وجه بالادست قرار گرفته است.

تفاوت نتایج حاصل از سری اول با نتایج بدست آمده از مطالعات (Nasiri Dehsorkhi et al (2010) که روی تلماسه‌های مشابه این سری انجام گرفته‌اند، می‌تواند ناشی از تفاوت قطر ذرات شن، نسبت عرض به عمق و طول موج تلماسه باشد.

4- نتیجه‌گیری

این تحقیق اثر تغییر ارتفاع تلماسه‌ها را در یک کانال با دیواره‌های پوشیده شده روی خصوصیات جریان آشفته بررسی کرده است. نتایج حاصل از این مطالعه به صورت زیر می‌باشند:

- افزایش ارتفاع تاج تلماسه از 4 به 8 سانتی متر، ناحیه جدایی جریان را از نزدیکی تاج تلماسه با ارتفاع 4 سانتی - متر به نزدیکی بخش فرورفته انتقال می‌دهد.

- نقطه پیوست مجدد با افزایش ارتفاع تاج تلماسه در فاصله دورتری از محل جدایی جریان قرار دارد و در فاصله $3\Delta d$ و $0/11\Delta d$ از قله به ترتیب برای ارتفاع 8 و 4 سانتی متر قرار گرفته است.

- افزایش ارتفاع تاج تلماسه از 4 به 8 سانتی متر باعث افزایش سرعت بیشینه شده و همچنین محل وقوع آن تغییر یافته است. با توجه به نسبت ظرافت کمتر از 5 و حضور پوشش گیاهی بر دیواره فلوم، جریان سه بعدی بوده و در هر دو ارتفاع، بیشینه سرعت جریان در زیر سطح آب و در عمق نسبی 0/62 رخ داده است.

- سرعت عمودی در تلماسه با ارتفاع تاج 4 سانتی متر، در محل جدایی جریان مثبت بوده و با افزایش ارتفاع تاج تلماسه به 8 سانتی متر، مقادیر مثبت در پایین دست ناحیه جدایی جریان، در منطقه برخاستگی روی وجه بالادست تلماسه، قرار دارند.

- با افزایش ارتفاع تاج تلماسه مقدار بیشینه تنش در فاصله دورتری از بستر اتفاق می‌افتد.

- and dunes", *Earth Sci. Rev.* Vol. 29, pp. 131-144.
- Mohajeri, S. H. Grizzi, S. Righetti, M. Romano, G. P., and Nikora, V. (2015). "The structure of gravel bed flow with intermediate submergence: A laboratory study". *Water Resources Research*, 51(11), 9232-9255.
- Nasiri, E.; Afzalimehr, H.; and Singh, V. P.; (2010). "Effect of bedforms and vegetated banks on velocity distributions and turbulent flow structure. *Journal of Hydrology Engineering*", ASCE. pp. 1-41.
- Nelson, J. M. Mclean, S. R. and Wolfe, S. R. (1993). "Mean flow and turbulence over two-dimensional bed form", *Water Resour. Res.* Vol. 29, pp. 3935-3953.
- Ojha, S. P.; and Mazumder, B. S. (2008). "Turbulence characteristics of flow region over a series of 2-D dune shaped structures", *Adv. Water Res.* Vol. 31, pp. 561-576.
- Shiono, K. and Feng, T. (2003). "Turbulence measurements of dye concentration and effects of secondary flow on distribution in open channel flows", *J. Hydraul. Eng.* Vol. 129, No. 5, pp. 373-384.
- Stoesser, T. M. Braun, C. Garcia-villalba M. and Rodi, W. M. (2008). "Turbulence structures in flow over two-dimensional dunes", *J. Hydraul. Eng.* ASCE. *Journal of Hydrology Engineering*. Vol. 134, No. 1, pp. 42-55.
- Van Mierlo, M. C. L. M. and de Ruiter, J. C. C. (1988). "Turbulence measurements above artificial dunes", Technical Report, TOW A55 Q789, PP. 142. Delft Hydraulics Laboratory, Delft, Netherlands.
- Venditti, J. G. (2007). "Turbulent flow and drag over fixed two- and three-dimensional dunes", *J. Geophys. Res.* 112, F04008, DOI: 10.1029/2006JF000650.
- 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.
- Xie, Z., Lin, B., and Falconer, R. A. (2014). "Turbulence characteristics in free-surface flow over two-dimensional dunes". *Journal of Hydro-environment Research*, 8(3), 200-209.
- transport and bed form stability", *Sedimentology*. Vol. 42, pp. 491-513.
- Bes., J. L. (1993). "On the interaction between turbulent flow structure, sediment transport and bed form 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, p. 360.
- Best, J. and Kostaschuk, R., (2002). "An experimental study of turbulent flow over a low angle dune". *J. Geophys. Res.* 107(C9), 3135.
- Carling, P. A., 1999, Subaqueous gravel dunes. *J. Sediment. Res.*, 69: 534-545.
- Carollo, F. G.; Ferro, V. and Termini, D. (2002). "Flow resistance law in channels with flexible submerged vegetation". *J. Hydraul. Eng.* Vol. 131, pp. 554-565.
- Dingman, S. L. (1984). *Fluvial hydrology*. W. H. Freeman and Company, New York, p. 383.
- Grass, A. J. (1971). "Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries", *J. Fluid Mech.* Vol. 50, 233-255.
- Guy, H. P., Simons, D. D. and Richardson, E. V., (1966). "Summary of alluvial channel data from flume experiments", 1956-1961. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 462-I: 96.
- Jerolmack, D. and Mohring, D. (2005). "Interactions between bed forms: topography, turbulence, and transport", *J. Geophys. Res.* 110: 1-13.
- Leeder, M. R. (1983). "On the interaction between turbulent flow, sediment transport and bedform mechanics in channelized flows", PP 5-18. In: J. D. Collinson, and J. Lewin (Eds), *Modern and Ancient Fluvial Systems: International Association of Sedimentologist Special Publication 6*, Balckwell Scientific Publications, Oxford.
- Lyn, D. A. (1993). "Turbulence measurements in open-channel flows over artificial bed forms", *J. Hydraul. Eng.* ASCE. Vol. 119, No. 3, pp. 306-326.
- Mazumder, B. S. Pal, D. Ghoshal, K. and Ojha, S. P. (2009). "Turbulence statistics of flow over isolated scalene and isosceles triangular-shaped bedforms", *J. Hydraul. Res.* Vol. 47, No. 5, pp. 626-637.
- McLean, S. R.; (1990). "The stability of ripples