مطالعه آزمایشگاهی تنش برشی ناشی از جریان غلیظ در کانال با قوس ۹۰درجه و بستر متحرک

مرضیه محمدی[۱] ومهدی قمشی*[۲]

۱-دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲*-نویسنده مسئول، استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. m.ghomeshi@yahoo.com

چکیده

اصولا جریان غلیظ یا چگال یک جریان دو فازی است که در اثرحرکت یک سیال درون یک سیال دیگر با چگالی متفاوت به‌وجود می‌آید. آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهیدچمران اهواز انجام شده‌اند. برای انجام آزمایش‌ها این تحقیق فلومی با طول کلی ۸/۵ متر، عمق ۷۰ سانتی‌متر، عرض ۲۰ سانتی‌متر و شیب کف ۰/۰۰۱ شامل سه قوس متوالی۹۰ درجه به شعاع انحنای ٤٠، ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. نتایج نشان داد در تمامی غلظت‌ها در خم اول و مقطع عرضی ابتدا حداکثر سرعت جریان غلیظ به سمت دیواره داخلی است. با ورود جریان به خم به علت تغییر ناگهانی انحنا و اثر نیروی گریز از مرکز در امتداد جداره داخلی کاهش فشار و در امتداد جداره بیرونی افزایش فشار روی می‌دهد. تغییرات تنش برشی نیز براساس تغییرات پروفیل عرضی سرعت بوده است به عبارتی تا میانه قوس بیشترین تنش در جداره داخلی قوس اتفاق افتاد و بعد از آن به سمت جداره خارجی قوس کشیده شد.

کلید واژه ها: جریان چگال، انحنا کانال، پروفیل سرعت، فرم بستر.

مقدمه

جریان‌های غلیظ در بسیاری از محیط‌های طبیعی و کاربردهای مهندسی هنگامی رخ می‌دهند که یک سیال با دانسیته بالاتر در سیال با دانسیته کمتر، جریان یابد. جریان غلیظ در شرایط بستر متحرک از سه ناحیه تشکیل شده است: آب زلال پیرامون، آب کدر و رسوبات(ذرات بستر). اندرکنش پیچیده‌ای جریان کدر با دو ناحیه دیگر، بررسی و تحلیل این جریان‌ها را مشکل کرده است. از دلایل آن می‌توان به‌وجود مواردی مثل اثر نیروی شناوری، اندرکنش ذرات با جریان و آشفتگی‌های موجود در سطح مشترک سیال محیطی با جریان کدر اشاره داشت. از دیگر تفاوت‌های میان جریان غلیظ و جریان در کانال‌های روباز می‌توان به ورود سیال پیرامون به درون جریان غلیظ، ایجاد جریان گردشی در سیال پیرامون و تفاوت در پروفیل‌های سرعت اشاره نمود. شتاب ثقل مؤثر بر جریان که به‌عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح می باشد، شتاب ثقل کاهش یافته نام دارد که به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$g' = g\frac{\rho_d - \rho_a}{\rho_a} \qquad (۱)$$

در این رابطه g': شتاب ثقل کاهش یافته، g: شتاب ثقل زمین(۹/۸۱)، ρ_a ، ρ_d: به‌ترتیب جرم مخصوص سیال پیرامون و سیال غلیظ برحسب (kg/m^3) می‌باشد.

از آنجائی‌که عامل حرکت در جریان‌های غلیظ نیروی ثقل می‌باشد، همانند جریان در کانال‌های باز از عدد فرود تشابه مدلی و بررسی رژیم جریان استفاده می‌گردد، با این تفاوت که در جریان غلیظ شتاب ثقل به دلیل اختلاف چگالی، کاهش یافته و به تبع آن عدد فرود نیز تغییر می‌نماید و آن را عدد فرود چگال می‌نامند، رابطه (۲):

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g'h\cos\theta}} \qquad (۲)$$

که در آن Fr_dعدد فرود چگال، U سرعت متوسط بدنه، h عمق جریان و θ زاویه بستر با افق می‌باشد.

حدفاصل مابین جریان کدر و سیال پیرامون معمولاً به آسانی قابل تشخیص نیست لذا برای بدست آوردن عمق و سرعت جریان نیاز به انتگرال گیری در عمق جریان (z) داریم. Turner, 1959) و Ellison) روابط زیر را برای بدست آوردن عمق h و سرعت متوسط U ارائه نمودند (Koti, 2009):

$$Uh = \int_0^{\infty} u dz \approx \int_0^{h_t} u dz \qquad (۳)$$

$$U^2 h = \int_0^{\infty} u^2 dz \approx \int_0^{h_t} u^2 dz \qquad (۴)$$

بنابراین با ترکیب روابط فوق می‌توان روابط (۵) و (۶) را استحصال نمود. در این روابط u سرعت نقطه ای جریان، h_t: ارتفاعی است که در آن سرعت برابر با صفر می شود، $\bar{U}$: سرعت متوسط جریان غلیظ، $\bar{h}$: عمق متوسط جریان غلیظ می‌باشد.

$$\bar{h} = \frac{(\int_0^\infty u dz)^2}{\int_0^\infty u^2 dz} = \frac{(\int_0^{h_t} u dz)^2}{\int_0^{h_t} u^2 dz} \qquad (۵)$$

$$\bar{U} = \frac{\int_0^\infty u^2 dz}{\int_0^\infty u dz} = \frac{\int_0^{h_t} u^2 dz}{\int_0^{h_t} u dz} \qquad (۶)$$

این نوع جریان روی یک بستر رسوبی (شکل۱)، می‌تواند عامل فرسایش یا رسوب‌گذاری باشد در این حالت، وقتی جریان غلیظ وارد آب زلال می‌شود، به‌طور هم‌زمان می‌تواند رسوبات معلق را روی بستر کانال ته‌نشین کند (رسوب‌گذاری) و یا ذرات بستر را وارد جریان کند (فرسایش) در واقع، جریان غلیظ هم‌زمان وارد می‌شود و ته‌نشین می‌گردد، اما یک شار خالص به بستر(جریان رسوب‌گذار) یا از بستر(جریان فرسایشی) وجود دارد. جریان‌های غلیظ، جریان‌های خود تولیدکننده هستند. به‌طوری‌که، با ته‌نشینی ذرات معلق ناپدید می‌شوند و با ورود رسوبات از کف، مجدداً تولید می‌شوند(Akiyama, 1984 و Stefan).

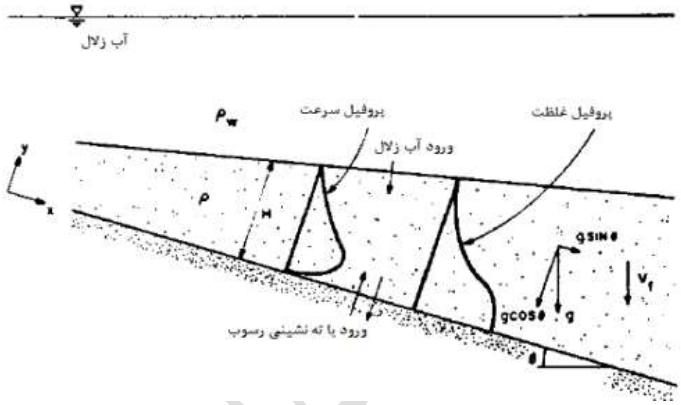


Fig. 1- A schematic of a density flow on mobile bed
شکل (۱) طرح شماتیکی از ساختار جریان غلیظ در حالت بستر متحرک

بنابراین ورود جریان پیرامون ارتباط نزدیکی با تلاطم ایجاد شده در بخش بالایی جریان دارد (لایه بیرونی)، در حالی‌که ورود رسوبات، وابسته به تلاطم تولیدی در نزدیکی کف کانال است (لایه داخلی) همچنین پروفیل غلظت می‌تواند در بخش بالایی جریان خطی، مشابه بخش پایینی توزیع رسوبات معلق در جریان کانال باز باشد(Akiyama, 1985و Stefan).

فرم بستر یا به عبارتی ناهمواری‌های بستر به شکل‌های مختلف در بستر رودخانه در اثر حرکت جریان به وجود می‌آیند و تأثیر مستقیمی روی زبری بستر و در نتیجه مقاومت در مقابل جریان دارند. از آنجا که محاسبات دبی- اشل رودخانه و سرعت جریان کاملاً به تعیین زبری فرم بستر بستگی دارد، شناخت فرم بستر از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد(ShafaieBajestan, 2008). از آنجایی که در مخازن سدها، زبری بستر با شکل‌گیری جریان غلیظ تغییر می‌یابد بنابراین، شناخت فرم بستر و تأثیر آن بر مشخصه جریان غلیظ از اهمیت زیادی برخوردار است. در شرایط بستر متحرک با افزایش سرعت یا قدرت جریان در واحد سطح بستر، فرم‌های بستر به شکل‌های مختلفی تشکیل می‌گردند. از طرف دیگر در تجزیه و تحلیل پروفیل‌های بدنه جریان غلیظ در یک بستر متحرک، این مسئله حائز اهمیت است که مقاومت در برابر جریان شامل دو بخش است: بخش اول زبری ناشی از اندازه ذرات و بخش دوم زبری به واسطه وجود شکل‌های بستر است (ShafaieBajestan, 2008).

تحلیل تنش برشی بستر متحرک

۱- تنش برشی در مسیر مستقیم

همانطور که مطرح شد، زبری یا مقاومت در مقابل جریان در رودخانه‌ها عبارت است از مجموعه‌ای از زبری ذره یا مقاومت ذره و زبری به خاطر فرم بستر که آنرا مقاومت فرم بستر گویند. مقاومت ذره قسمتی از مقاومت جریان میباشد که در اثر نیروی رانش سطحی بوجود می‌آید، درحالیکه مقاومت فرم بستر در اثر اختلاف فشار بین سطح جلو و سطح انتهایی فرم بستر و ایجاد

جداشدگی خطوط جریان به‌وجود می‌آید. مقدار تنش برشی در بستر رودخانه را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\tau_b = \tau_{bs} + \tau_{bf} \qquad (۷)$$

که در آن τ_{bs} بخشی از تنش برشی است که صرف مقاومت ذره می‌شود و τ_{bf} بخش دیگری از تنش برشی که صرف مقاومت فرم بستر می‌گردد. به طور کلی در جریان پایدار در کانال‌های روباز، تنش برشی بستر از رابطه زیر حاصل می‌گردد.

$$\tau_b = \rho U_*{}^2 = \rho g h S \qquad (۸)$$

در رابطه فوق، h:عمق جریان و s: شیب کانال است. این رابطه در جریان غلیظ، به دلیل فاکتور اختلاط جریان آب زلال با جریان غلیظ قابل استفاده نخواهد بود (Sequeiros et al., 2010) بنابراین باید فاکتور سرعت برشی (U_*) بستر به کمک تابع لگاریتمی سرعت و در ناحیه دیواره جریان محاسبه گردد (رابطه ۹).

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{K} ln\left(\frac{30z}{K_s}\right) \qquad (۹)$$

در این معادله، U:سرعت متوسط جریان، K: ضریب وون کارمن (۰/۴۰۵)، Z ارتفاع جریان و K_s: ضریب زبری بستر است. همچنین، چگالی ذرات رسوب و چگالی جریان در نزدیکی بستر است. برای محاسبه τ_{bf} و τ_{bx} معادلات تجربی زیادی وجود دارد که برای شرایط رودخانه‌های با مصالح بستر رسوبی معتبر هستند. از اینرو، رابطه ۱۰که توسط محققین برای محاسبه سرعت برشی در شرایط بستر متحرک گسترش داده شده است، استفاده می‌گردد (Sequeiros et al, 2010).

در محاسبه سرعت برشی به کمک این رابطه، نقاط پروفیل سرعت از سطح بالای فرم بستر تا رقوم معادل سرعت ماکزیمم به کار گرفته می‌شود. n: تعداد رقوم مورد استفاده z_i ،u_i سرعت و رقوم نظیر آن در هر نقطه هستند.

$$U_* = k \frac{n\sum u_i \ln z_i - \sum u_i \sum \ln z_i}{n\sum \ln^2 z_i - (\sum \ln z_i)^2} \qquad (۱۰)$$

۲- تنش برشی در قوس

تغییرات تنش‌برشی در قوس نسبت به مسیر مستقیم، عامل اصلی فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها می‌باشد. برای به دست آوردن تنش برشی در قوس از رابطه کوپر به‌صورت زیر استفاده شده است (Morris,1998 ;Kassem, 2004):

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g}{c^2}\, \bar{u}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \qquad (۱۱)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g}{c^2}\, \bar{v}\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \qquad (۱۲)$$

که τ_{bx} به τ_{by} ترتیب تنش‌برشی در جهت طولی (رابطه) و عرضی (رابطه) می‌باشند، در روابط بالا ρ: جرم مخصوص سیال و g: شتاب ثقل می‌باشد. در معادلات بالا u و v به‌ترتیب متوسط عمقی سرعت در جهت طولی و عرضی و c ضریب شزی می‌باشد. برای محاسبه تنش برشی کل بستر از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\tau_b = \sqrt{\tau_{bx}{}^2 + \tau_{by}{}^2} \qquad (۱۳)$$

مطالعه‌های نسبتا کمی نیز در خصوص تأثیر زبری مصنوعی بستر بر مشخصات جریان غلیظ در مسیر مستقیم انجام شده است: از جمله (Fernandez و Imberger, 2006)، (Kaheh, 2012 و (Varjavand, 2013). نتایج این تحقیقات نشان داده است که تغییرات زبری بستر بر روی خصوصیات جریان غلیظ مانند پروفیل سرعت و غلظت، سرعت پیشانی، ضریب کشش آب شفاف و میزان ته‌نشینی اثرگذار خواهد بود، اما در زمینه حرکت جریان غلیظ بر روی بستر متحرک (با تشکیل فرم بستر) مطالعات بسیار کمی انجام شده است. از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد(Parker et al., 1987). آزمایش‌های جریان غلیظ را روی بستر فرسایش‌پذیر با رسوبات کف مشابه رسوبات جریان در رژیم جریان فوق بحرانی مورد بررسی قرار دادند و پروفیل‌های سرعت و غلظت، ضرایب اصطکاک، نرخ ورود رسوبات و نرخ سختی آب را اندازه‌گیری کردند. Islam و Imran (2008) به بررسی نتایج حاصل از مطالعه‌های آزمایشگاهی مربوط به پیشروی جریان غلیظ زیرگذر در یک خم سینوسی که بصورت معبری داخل یک حوضچه آزمایشگاهی ایجاد شده است پرداختند. نتایج آزمایش‌ها انجام شده در خم نشان داد همان‌طور که عدم تعادل بین نیروی گریز از مرکز و نیروی اختلاف فشار موجب تشکیل جریان حلزونی در رودخانه های مئاندری می‌شود، این عدم تعادل منجر به شکل‌گیری چرخش‌های ثانویه در جریان غلیظ زیرگذر نیز می‌گردد. ساختار سرعت اولیه و ثانویه در بدنه‌ی جریان غلیظ توسعه یافته که در امتداد مسیر سینوسی منتقل می‌شود، استنتاج گردید. سرعت ثانویه ناشی از انحنا، وجود دو هسته چرخشی با چرخش متفاوت را نشان می‌دهد که یکی از آن‌ها بالای دیگری شکل می‌گیرد. شکل

چرخش هسته پایینی به آنچه پیش از این در مجاری روباز مشاهده شده است، شبیه می‌باشد، درحالی‌که هسته چرخشی بالاتر جهت مخالفی دارد. هم‌چنین ایشان دریافتند در جریان غلیظ بر خلاف جریان در مجاری روباز، نیروی اختلاف فشار که در جهت برقراری تعادل با نیروی گریز از مرکز عمل می‌کند، در راستای عمق جریان ثابت نیست که این امر به دلیل تغییرات دانسیته در عمق می‌باشد. به علت اختلاف دانسیته بسیار کوچک بین ناحیه بالای جریان غلیظ و سیال محیطی، محل تلاقی جریان غلیظ و سیال پیرامون به وضوح قابل تشخیص نمی‌باشد.

Abad et al. (2011) جریان ثانویه ناشی از عبور جریان غلیظ نمکی ازکانالی با پیچ و خم زیاد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد پروفیل قائم سرعت در امتداد جریان و اختلاف چگالی نسبی جریان غلیظ زیرگذر مرتباً با عدد فرود چگال (Fd) تغییر می‌کند. هنگامی که عدد Fd کاهش می‌یابد، بیشترین سرعت در رأس خم به سمت محل تلاقی جریان غلیظ با محیط پیرامون میل می‌کند و پروفیل اختلاف چگالی نسبی اضافی بجز در محل تلاقی یکنواخت تر می‌شود. هنگامی که Fd افزایش پیدا می‌کند، سرعت بیشترین مماس به سمت بستر متمایل می‌شود. ایشان در آزمایش ها خود به سه دامنه عدد فرود چگال دست یافتند که سه رژیم جریان را از هم متمایز می‌سازد. ۱- رژیم بالایی با عدد فرود چگال بالا که تقریباً همه‌ی اعداد در محدوده جریان فوق بحرانی وجهت جریان ثانویه معکوس می‌باشد (به سمت ساحل بیرونی). ۲- رژیم متوسط با مقادیر متوسط عدد فرود چگال جهت جریان ثانویه نرمال (به سمت ساحل داخلی) بوده و جریان می‌تواند زیر بحرانی و یا فوق بحرانی باشد. ۳-رژیم پایینی با عدد فرود چگال پایین که جریان زیر بحرانی بوده و جهت جریان ثانویه معکوس می‌باشد.

نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که پروفیل سرعت و غلظت جریان، علاوه بر آبشتگی به پارامترهای هیدرولیکی و هندسی جریان، به دانه‌بندی بستر و تنش‌های برشی ناشی از آن نیز وابسته است (Turner, 1973). بنابراین، نادیده گرفتن رسوبات بستر موجب می‌شود که اثر متحرک بودن رسوبات کف و یا تشکیل فرم‌های بستر نادیده گرفته شود و نتایج آزمایشگاهی با خطا همراه شود. بنابراین، با توجه به اهمیت نقش بستر رسوبی در تحلیل مشخصات جریان غلیظ، و نزدیک شدن به نتایج واقعی‌تر در طبیعت، رفتار جریان غلیظ در قوس با بستر فرسایشی، بررسی چگونگی رسوب‌گذاری در قوس‌ها و مقایسه خصوصیات جریان در شعاع انحنا ملایم، متوسط و تند از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. این جریان‌ها مکانیزم اصلی انتقال جریان‌های رودخانه‌ای، ساحلی و ذرات کف اقیانوس به آب‌های عمیق‌تر است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. این آزمایش ها در فلومی با طول کلی ۸/۵ متر، عمق ۷۰ سانتی‌متر، عرض ۲۰ سانتی‌متر و شیب کف ۰/۰۰۱ ، دارای سه خم متوالی ۹۰ درجه به شعاع انحنای۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ انجام شد (شکل۲). برای انجام این آزمایش ها از نمک طعام و ماده رنگی حلال در آب برای ایجاد سیال غلیظ استفاده گردید. علت استفاده از ماده رنگی به همراه محلول آب و نمک برای تشخیص سیال غلیظ (محلول آب و نمک) از سیال پیرامون (آب شهری) و قابل روئیت بودن آن می باشد. آزمایش‌ها به‌صورت جریان نمکی و در چهار دبی ۰/۷، ۱، ۱/۵ و ۲ لیتر در ثانیه و در غلظت‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ گرم در لیتر صورت پذیرفت. به دلیل کم بودن حجم مخزن‌های اختلاط به تنهایی(۲۰۰۰ لیتر) سیال غلیظ(محلول آب، نمک و ماده رنگی) تهیه شده در دو مخزن اختلاط آماده، و بطور جداگانه توسط پمپ از هر مخزن سیال غلیظ به یک هد تانک با ارتفاع ثابت بصورت پیوسته تا پایان آزمایش‌ها منتقل گردید (شکل۳). مشخصات بستر فرسایش‌پذیر، برای تهیه بستر متحرک در کف فلوم با توجه به شرایط ویژه‌ی جریان‌های غلیظ (سرعت‌های بسیار کم در فلوم‌های کوچک آزمایشگاهی)، در این تحقیق نیاز بوده است تحقیقات جامعی در بخش مشخصات مواد و کاربری آن‌ها به‌عنوان مصالح بستر فرسایشی انجام گیرد و هم‌چنین، پیش آزمایش‌هایی در راستای این اهداف طراحی و اجرا گردد. بنابراین با توجه به امکانات و محدودیت مواد مناسب برای شرایط آزمایشگاهی فوق، مهم‌ترین نکات در انتخاب این مواد، جنس، دانه‌بندی، چگالی مخصوص، سهولت بکارگیری و کاربری آن‌ها در راستای اهداف تحقیق خواهد بود. از مهمترین ویژگی برای رسوبات بستر، چگالی مخصوص ذرات است که تهیه آن را بسیار مشکل می‌سازد. زیرا با توجه به سرعت‌های پایین جریان‌های غلیظ برای حرکت این رسوبات و خصوصاً تشکیل فرم‌های بستر، نیاز به ذرات با چگالی مخصوص پایین می‌بود (در تحقیق (Sequeiros et al., 2010) و (Rastello et al., 2002) به‌ترتیب ذرات با چگالی مخصوص۱/۵۳ و ۱/۰۶ استفاده شده است). بدین ترتیب، پس از طی مراحل فوق و سعی و خطاهای بسیار با مواد متفاوت، رسوباتی از جنس پلیمر (پلی استایرن انبساطی) با مشخصات ارائه شده در جدول (۱)، مورد استفاده قرار گرفت.



Fig. 2- Sketch of experimental flume

شکل(۲) فلوم مورد استفاده برای آزمایش(نما از بالا)

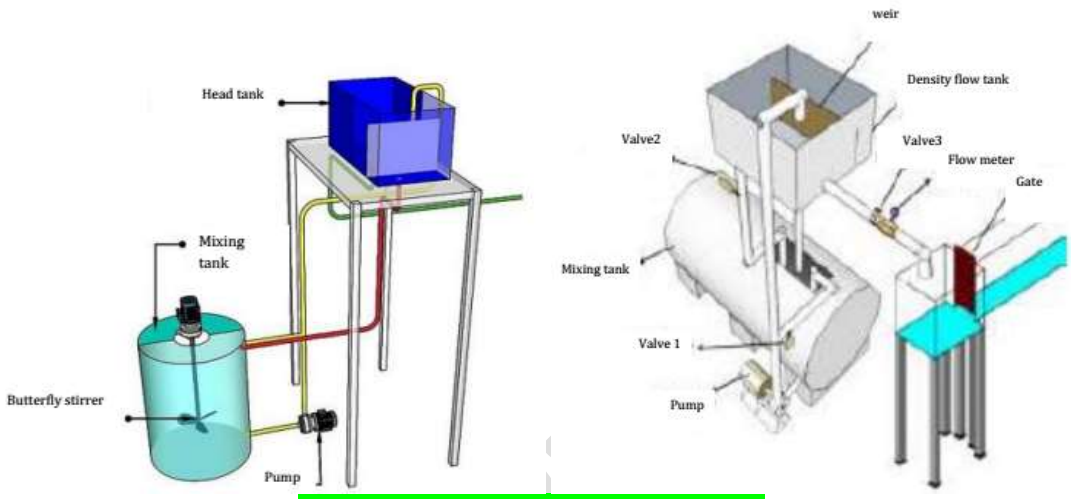


Fig. 3- Mixing tanks by means of a pump

شکل(۳)مخزن های اختلاط

جدول (۱) مشخصات رسوبات بستر

Table1- Specifications of bed sediment

Sediment type	EPS
Sediment density*(kg/m^3)	1070
sediment average diameter(d50 µm)	450
Sediment diameter (d90 µm)	660
Geometric standard deviation(σg)	1.4

*دانسیته رسوب در حالت مرطوب اندازه گیری شده است.

رسوبات با ارتفاعی در حدود ۸ سانتی‌متر در فاصله یک متری از دریچه پس از یک سطح شیبدار ملایم که به‌عنوان آرام کننده جریان عمل می‌کند قرار گرفته است (شکل۴). پیش از ورود جریان غلیظ فلوم به‌طور کامل آبگیری شده و شیرفلکه ورود سیال غلیظ به محوطه پشت دریچه فلوم باز می‌شد (در انتهای ۵۰ سانتی‌متری ابتدایی کانال یک دریچه برای عبور جریان غلیظ تعبیه شده است. با گشودن این دریچه جریان غلیظ در کف فلوم و در زیر آب ساکن به حرکت در می‌آید). اندازه‌گیری دبی ورودی از طریق دبی‌سنج و تنظیم آن از طریق شیرفلکه مذکور صورت می‌گرفت. پس از تنظیم دبی به محض آنکه سطح سیال غلیظ پشت دریچه فلوم برابر با سطح سیال پیرامون می‌گشت دریچه فلوم گشوده می‌شد. بدین شکل جریان غلیظ با دبی تنظیم شده وارد فلوم می‌گشت. حرکت جریان غلیظ زیر سیال محیطی آغاز و پس از رسیدن راس جریان غلیظ به انتهای فلوم شیر فلکه انتهای فلوم باز می‌شود برای ثابت نگه داشتن سطح آب ساکن، شیرفلکه ورودی آب تمیز به فلوم باز و مقدار آب لازم به فلوم اضافه می‌شد تا مانع از افت تراز آب گردد. برای جلوگیری از به‌وجود آمدن تلاطم در این ناحیه تیغه آرام‌کننده جریان در انتهای فلوم نصب گردید. بعد از تخلیه کامل راس جریان و حصول اطمینان از یکنواخت بودن بدنه جریان در طول فلوم، ارتفاع جریان غلیظ در هر قوس در فاصله ۱۰ سانتی‌متری در طول فلوم در دو دیواره داخلی و خارجی قرائت و ثبت گردید. به منظور برداشت ارتفاع بدنه از اشل با دقت ۱ میلی‌متر استفاده گردید. در دیواره داخلی و خارجی هر سه قوس، خط‌کش‌های تلقی به‌فاصله ۱۰سانتی‌متر نصب شده‌اند (شکل۵). برای اندازه‌گیری سرعت از سرعت سنج داپلر اکوستیک (Acoustic Doppler)، (ADV) مدل Vectrino+ استفاده شده است (شکل۶). این دستگاه می‌تواند نوسانات سرعت را در یک بازه زمانی مشخص در سه راستای عمود بر هم ثبت و به کمک نرم‌افزار مربوطه پردازش نماید. اندازه‌گیری سرعت توسط این دستگاه بر پایه پدیده داپلر استوار است. در این تحقیق در هر خم ۱۶ آزمایش و در مجموع ۴۸ آزمایش انجام شده است که جدول (۲) خلاصه‌ای از آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در جدول (۳) مشخصات هر آزمایش به ازاء دبی و غلظت مختلف در هر خم آورده شده است.



Fig. 4- Mobile bed Polystylene material

شکل(٤) بستر متحرک در کف فلوم با رسوباتی از جنس پلی استایرن



Fig. 5- Elevation measurement of density flow

شکل(٥) اشل اندازه‌گیری عمق جریان غلیظ



Fig. 6- ADV measurement principles
شکل(٦) نمای کلی از دستگاه سرعت‌سنج ADV

جدول (۲) خلاصه آزمایش ها انجام شده
Table 2- Summary of experiments

parameters	Variable number	Explanation
Radius of relative curvature	3	$\frac{R}{B}$=2, 4, 6
Concentration (g / l)	4	10,15,20 and 25
Discharge(l/s)	4	0.7, 1, 1.5 and 2
Slope	1	.....
Experiment sum	48	.....

جدول(۳) مشخصات هر آزمایش به ازاء دبی و غلظت‌ها مختلف در هر خم
Table 3- Specifications of each test for a discharge and different concentrations in each bend

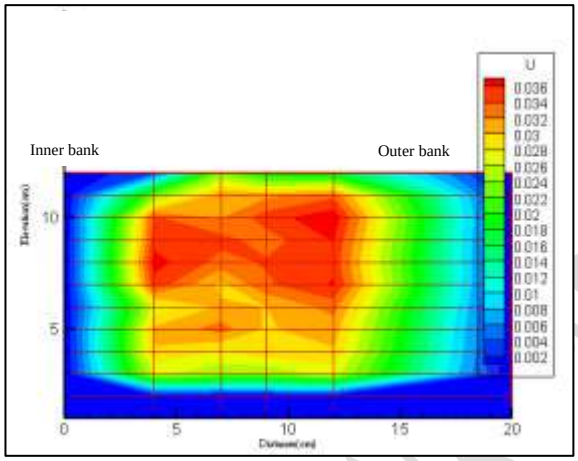
Test number on each bend	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Discharge(l/s)	0.7	0.7	0.7	0.7	1	1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2	2	2
Concentration (gr / l)	10	15	20	25	10	15	20	25	10	15	20	25	10	15	20	25

نتایج و بحث

در این تحقیق برای اندازه‌گیری سرعت از سرعت سنج داپلر اکوستیک(ADV) مدل Vectrino+ استفاده شده است. این وسیله مؤلفه‌های سرعت را در راستای گیرنده‌ها و یا محورهای X، Y و Z اندازه‌گیری می‌کند. به‌منظور انجام آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری سرعت جریان در این مورد نیز پس از یکنواخت شدن بدنه جریان سرعت‌های نقطه‌ای لحظه‌ای در ۹ مقطع (در ابتدا، وسط و انتهای هر قوس) توسط سرعت سنج ثبت می‌گردید. در این تحقیق با استفاده از دستگاه سرعت سنج صوتی (ADV) مؤلفه‌های سرعت (u، v، w) در ۴۸ نقطه (۴ نقطه درعرض و ۱۲نقطه در عمق) در هر مقطع عرضی اندازه‌گیری و ذخیره شد. مدت زمان ذخیره مؤلفه‌های سرعت لحظه‌ای در هر نقطه ۲۰ تا ۳۰ ثانیه به طول انجامید؛ داده برداری دستگاه ADV در راستای ارتفاع از بالا به پایین صورت گرفت سپس دستگاه به سمت نقطه‌ی بعدی جا به جا شده و این عمل تا برداشت همه نقاط ادامه یافت. پس از ثبت داده‌ها، داده‌های ذخیره شده با فرمت dat.به محیط نرم افزار Excel انتقال و برنامه‌ای تنظیم شد تا بتوان با میانگین‌گیری از بین اعدادی با correlation>70 و SNR>15 متوسط هر یک از مؤلفه‌های سرعت را برآورد نماید. برای نشان دادن تغییرات الگوی جریان با استفاده از داده‌های فوق توزیع عرضی سرعت در مقاطع مختلف ترسیم گردیده است.

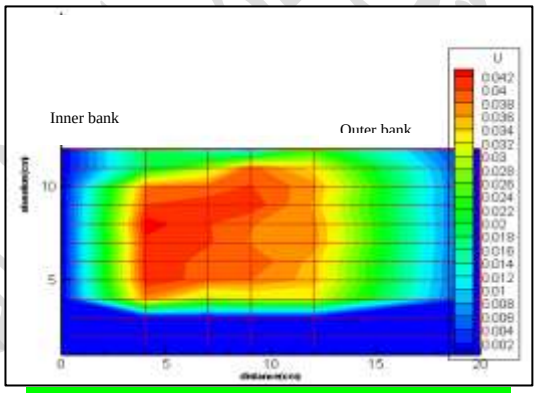
(شکل ۷) پروفیل عرضی سرعت در مسیر مستقیم ۱۸۰ سانتی‌متری قبل از ورود جریان به خم را به ازاء دبی جریان غلیظ ۲/۵۲

لیتر در ثانیه و غلظت ۱۵ گرم در لیتر نشان می‌دهد. در ابتدای قوس اول جریان پروفیل عرضی خود در مسیر مستقیم را حفظ نکرده و تغییر نشان می‌دهد. برداشت داده‌های سرعت در خم با شعاع انحنای ۴۰ سانتی‌متر با توجه به کوتاه بودن طول خم در فاصله ۵ سانتی‌متری از ابتدای خم و در خم‌های با شعاع انحنای ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از ابتدای خم انجام گرفته است. با نزدیک شدن جریان به ابتدای خم، حداکثر سرعت به سمت جداره داخلی کشیده می‌شود در تمامی شکل‌ها سرعت برحسب(m/s) می‌باشد(شکل۸).



شکل (۷) پروفیل عرضی سرعت در مسیر مستقیم ۱۸۰ سانتی‌متری

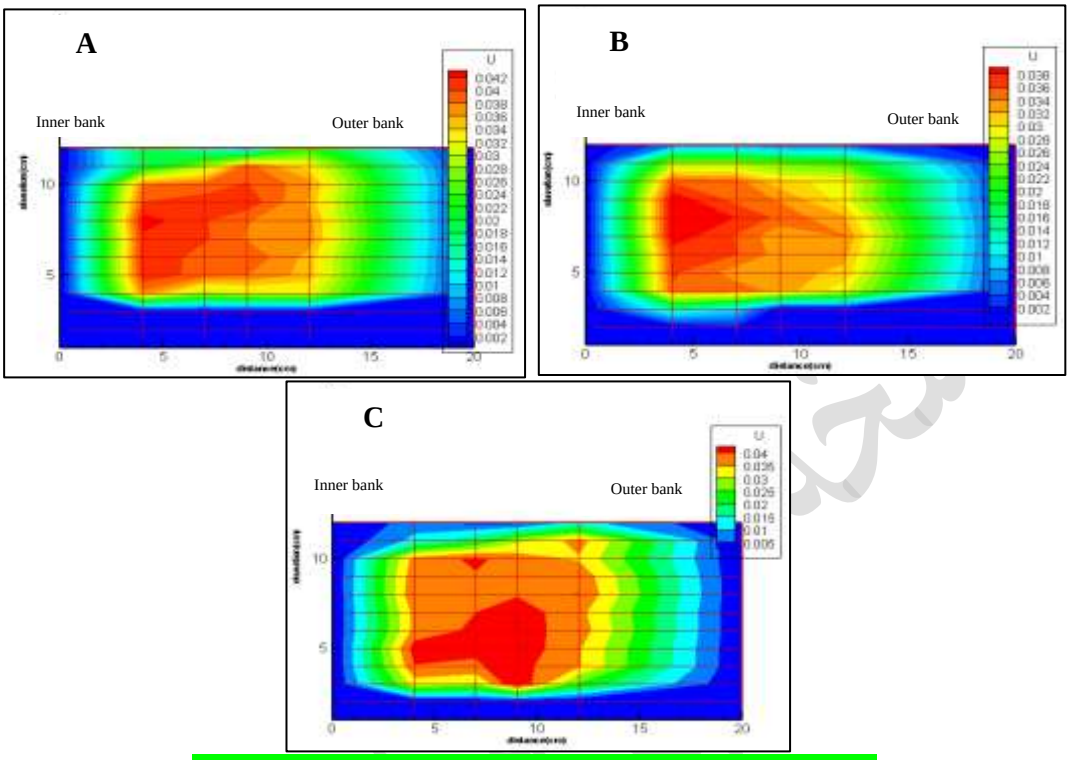
Fig. 7- Velocity cross profile at the 180cm straight reach



شکل (۸) پروفیل عرضی سرعت در ابتدای قوس اول

Fig. 8- Velocity cross profile at the beginning of first bend

براساس نتایج به‌دست آمده در خم اول و مقطع عرضی دوم (میانه خم) حداکثر سرعت به سمت دیواره داخلی است. این امر در خصوص غلظت‌های دیگر نیز صادق است. زیرا با ورود جریان به خم به علت تغییر ناگهانی انحنا و اثر نیروی گریز از مرکز در امتداد جداره داخلی، کاهش فشار و در امتداد جداره بیرونی افزایش فشار روی می‌دهد. آزمایش‌ها نشان داد با حرکت جریان در طول خم، عمق جریان در امتداد دیواره داخلی کاهش و در امتداد دیواره بیرونی افزایش می‌یابد. در نزدیکی دیواره داخلی گرادیان فشار طولی منفی رخ داده و باعث شتاب گرفتن ذرات می‌گردد. در مقابل در نزدیکی دیواره بیرونی گرادیان فشار طولی مثبت بوده و فشار در امتداد جریان افزایش می یابد (شکل۹).



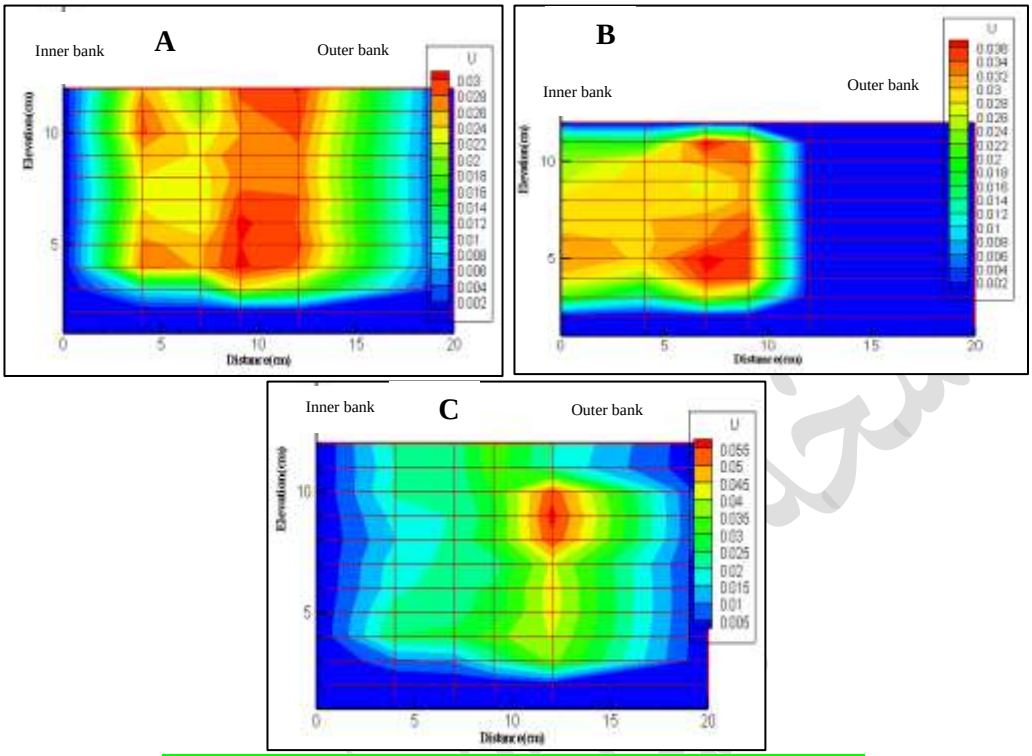
شکل(۹) پروفیل عرضی سرعت در A: ابتدا، B: میانه وC: انتهای قوس اول

Fig. 9- Velocity cross profile at the A: Beginning, B: Middle, C: End of first bend

براساس نتایج به‌دست آمده در این تحقیق و نیز سایر تحقیقات صورت گرفته(Abad et al., 2011)، (Keevil et al., 2006)، (Coreny et al., 2006)، (Kasam et al., 2004)، در جریان غلیظ بر خلاف جریان در مجاری روباز جریان ثانویه در کف به سمت دیواره بیرونی و در سطح مشترک به سمت دیواره داخلی است. جریان ثانویه ایجاد شده منجر به نزدیک شدن سرعت بیشینه به دیواره بیرونی شده و حداکثر سرعت به سمت دیواره بیرونی منتقل می‌شود. این امر در پروفیل‌های عرضی سرعت در خم دوم و سوم مشاهده می‌گردد. نتایج آزمایش‌های انجام شده در خم نشان داد همانطور که عدم تعادل بین نیروی گریز از مرکز و نیروی اختلاف فشـــار موجـب تشـــکیل جریان حلزونی در رودخانه‌های مئاندری می‌شـود، این عدم تعادل منجر به شکل‌گیری چرخش‌های ثانویه در جریان غلیظ زیرگذر نیز می‌گردد. پروفیل تغییرات سرعت در ابتدا، میانه و انتهای قوس دوم و سوم برای دبی جریان غلیظ ۲/۵۲ لیتر بر ثانیه و غلظت ۱۵ گرم برلیتر در شکل های(۱۰ و ۱۱)نشان داده شده است.

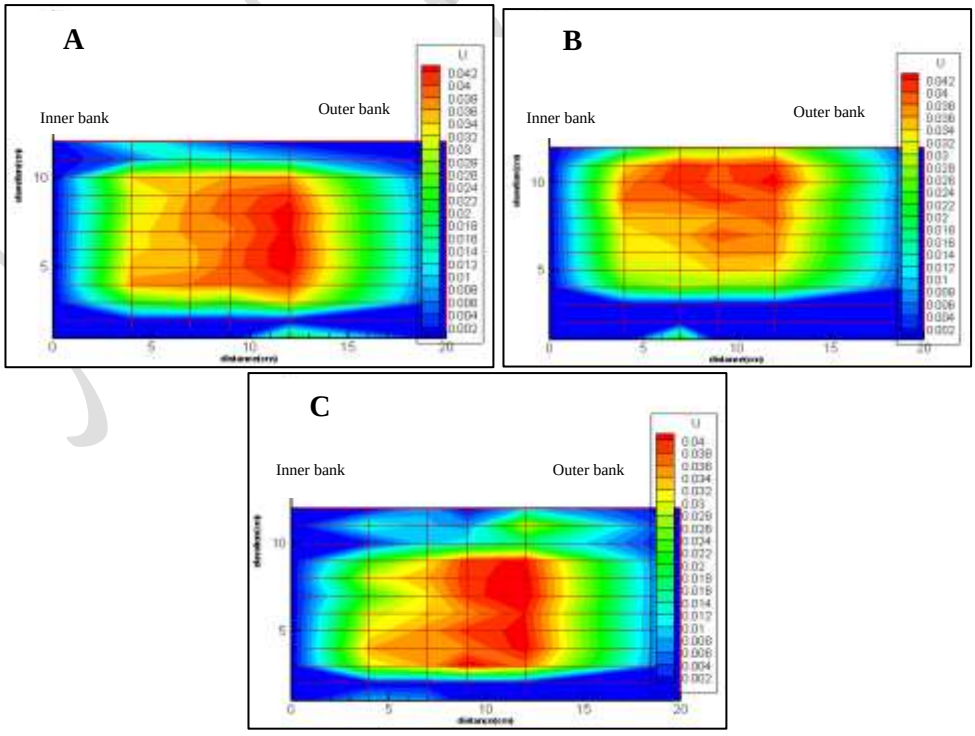
نیروی گریز از مرکز با شعاع انحنا رابطه معکوس داشته و در نتیجه با افزایش شعاع انحنا نیروی گریز از مرکز کاهش می‌یابد. کاهش نیروی گریز از مرکز موجب کاهش جریان‌های ثانویه ناشی از آن می‌گردد. این امر منجربه افزایش سرعت جریان در مسیر جریان شده و با توجه به دائمی بودن جریان، عمق جریان غلیظ نیز کاهش می‌یابد؛ به‌طوریکه در مقاطع عرضی خم سوم بیشترین سرعت و کمترین عمق جریان غلیظ را می‌توان مشاهده نمود. هم‌چنین با افزایش غلظت، مؤلفه وزن سیال در جهت شیب افزایش می‌یابد. در یک غلظت و دبی ثابت با افزایش شعاع انحنا، سرعت در رأس خم و محور مرکزی کانال به دلیل کاهش اثر نیروی گریز از مرکز افزایش می‌یابد. هم‌چنین در خم ســوم با نســبت شــعاع انحنای ۶ به دلیل فاصــله کم این خم تا محل تخلیه، جریان تحت تأثیر خروجی قرار می‌گیرد؛ در نتیجه افت تدریجی تراز آب و افزایش ســرعت ناشــی از آن را خواهیم داشت که این امر افزایش سرعت ناشی از کاهش نیروی گریز از مرکز را تشدید می‌کند. براساس نتایج به دست آمده سرعت در انتهای خم دوم نسبت به رأس خم اول به‌طور متوسط ۲۸

درصد و در رأس خم سوم نسبت به انتهای خم اول به‌طور متوسط
۴۴ درصد افزایش نشان می‌دهد.



شکل (۱۰) پروفیل عرضی سرعت در A: ابتدا، B: میانه و C: انتهای قوس دوم

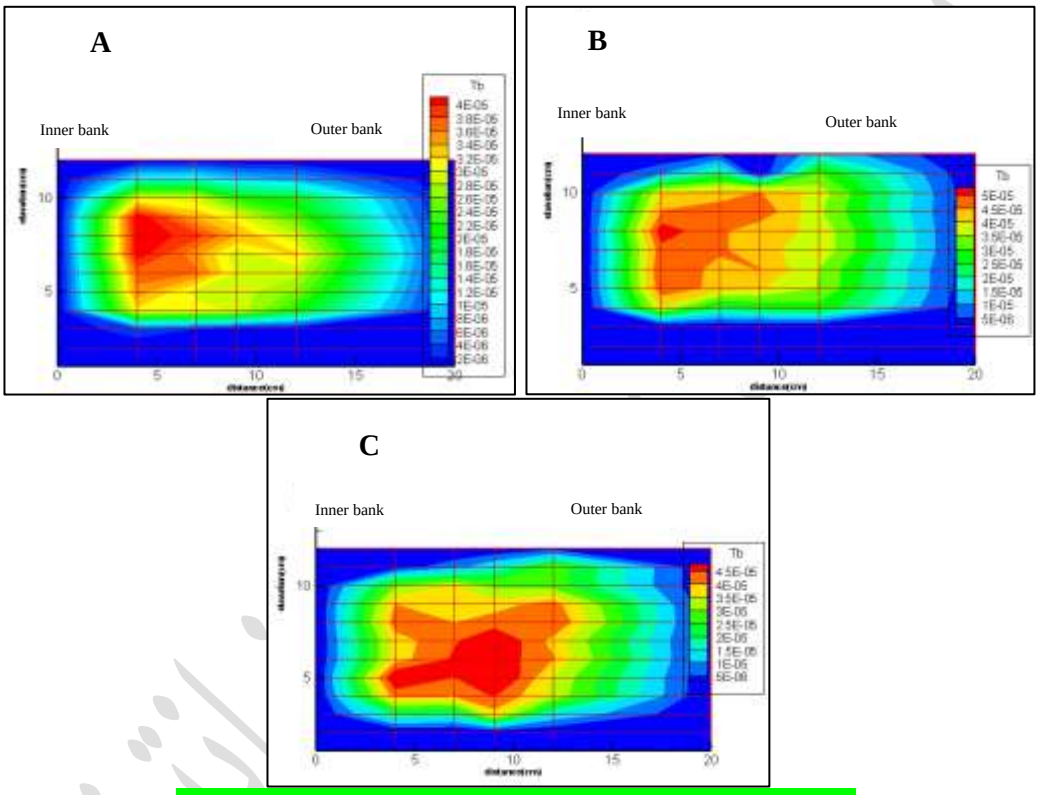
Fig. 10- Velocity cross profile at the A: Beginning, B: Middle, C: End of second bend



شکل (۱۱) پروفیل عرضی سرعت در A: ابتدا، B: میانه و C: انتهای قوس سوم

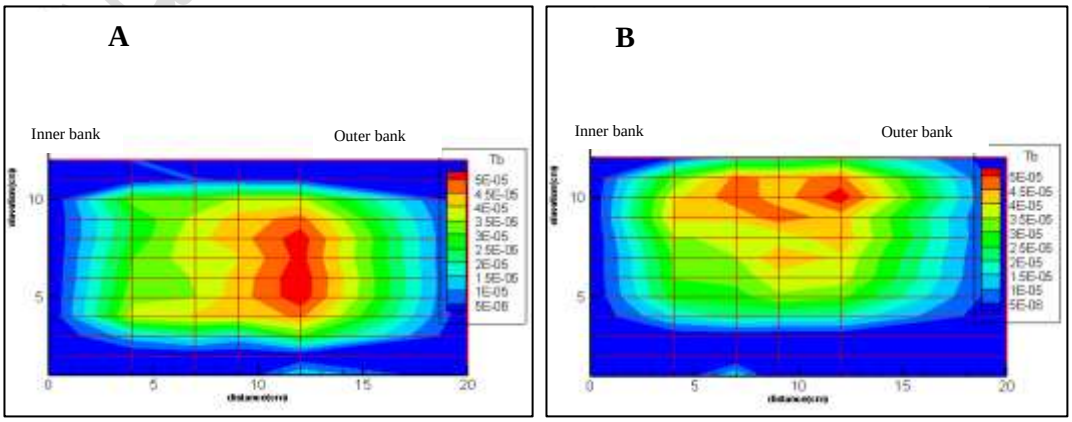
Fig . 11- Velocity cross profile At the A: Beginning, B: Middle ,C: End of third bend

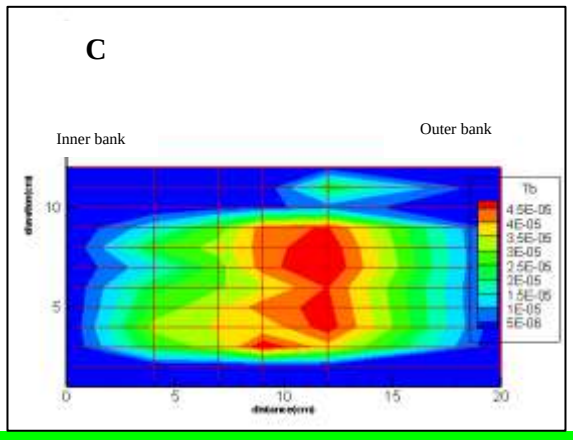
نمودار تغییرات بیشترین تنش‌برشی در طول هرسه قوس ترسیم شده است. با توجه به شکل‌ها می‌توان گفت که در حالت کلی، در ابتدای قوس، به علت ایجاد گرادیان فشار منفی بیشترین سرعت به سمت داخلی قوس کشیده می‌شود و تا میانه قوس ادامه می‌یابد و متعاقبا بیشترین تنش‌برشی در نزدیکی دیواره داخلی اتفاق افتاده و زمانی که به انتهای قوس رسیده جریان تحت تاثیر جریان ثانویه قرار گرفته و بیشترین سرعت وتنش به‌سمت دیواره خارجی انتقال می‌یابد. تغییرات تنش‌برشی در ابتدا، میانه و انتهای قوس اول و سوم برای دبی ۲/۵۲ لیتر بر ثانیه و غلظت ۱۵ گرم برلیتر در شکل (۱۲و ۱۳) نشان داده شده است.



شکل (۱۲) پروفیل تنش برشی در A: ابتدا، B: میانه و C: انتهای قوس اول،

Fig. 12- Shear stress profile At the A: Beginning, B: Middle, C: End of first bend



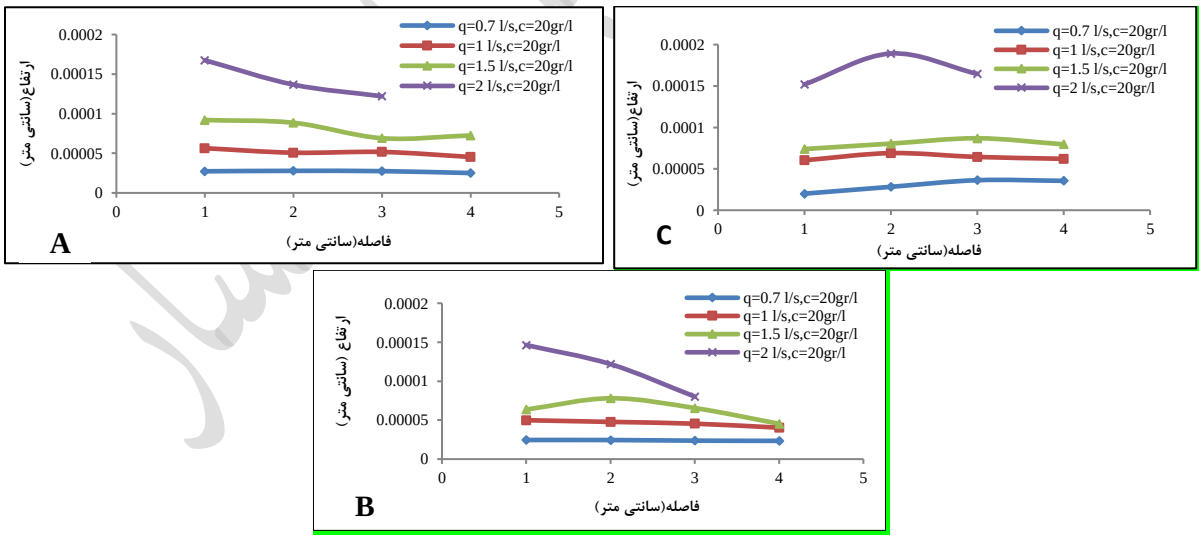


شکل (۱۳) پروفیل تنش برشی در A: ابتدا، B: میانه و C: انتهای قوس سوم

Fig.13- Shear stress profile At the A: Beginning, B: Middle, C: End of third bend

جریان ثانویه ایجاد شده منجر به نزدیک شدن سرعت بیشینه به دیواره بیرونی شده و حداکثر سرعت به سمت دیواره بیرونی منتقل می‌شود. این امر در پروفیل‌های عرضی سرعت در خم دوم و سوم مشاهده می‌گردد. تغییرات تنش برشی نیز براساس تغییرات پروفیل عرضی سرعت بوده است به عبارت دیگر تا میانه قوس بیشترین تنش در جداره داخلی قوس اتفاق افتاد و بعد از آن به سمت جداره خارجی قوس کشیده شده است. با توجه به نتایج، در سرعت‌های کم تنش‌برشی بستر نیز کم است. سپس با افزایش قدرت جریان، فرم بستر شکل گرفته، که سبب افزایش زبری و تنش‌برشی بستر نیز شده است. در ادامه، افزایش تنش‌برشی با شکل‌گیری کامل فرم بستر، افزایش یافته و بعد از آن، به تدریج با شسته شدن فرم بستر، سطح بستر صاف و تنش‌برشی کاهش یافته است. متوسط تغییرات تنش برشی در یک قوس در شکل(۱۴) نشان داده شده است

.



شکل (۱٤) متوسط تنش برشی عرضی در غلظت ۲۰ گرم بر لیتر در دبی‌های مختلف در A: ابتدا، B: میانه و C: انتهای قوس اول

Fig. 14- Average shear stress in different discharge and concentration 20gr/L at the A: Beginning , B: Middle , C: End of first bend

نتیجه گیری

تغییرات جریان اصلی و تنش‌برشی کل بر شکل‌گیری و گسترش انباشتگی در دیواره داخلی در معبرهای زیر آبی مؤثر خواهد بود و در نهایت ممکن است بر تغییر شکل این کانال‌ها نیز اثر گذارد. ساختار سرعت اولیه و ثانویه در بدنه‌ی جریان غلیظ توسعه یافته که در امتداد مسیر سینوسی منتقل می‌شود، استنتاج گردید. سرعت ثانویه ناشی از انحنا، وجود دو هسته چرخشی با چرخش متفاوت را نشان می‌دهد که یکی از آن‌ها بالای دیگری شکل می‌گیرد. شکل چرخش هسته پایینی به آنچه پیش از این در مجاری روباز مشاهده شده است، شبیه می‌باشد، درحالی‌که هسته چرخشی بالاتر جهت مخالفی دارد(Kassem, 2004 و Imran). در جریان غلیظ برخلاف جریان در مجاری روباز، نیروی اختلاف فشار که در جهت برقراری تعادل با نیروی گریز از مرکز عمل می‌کند، در راستای عمق جریان ثابت نیست که این امر به دلیل تغییرات دانسیته در عمق می‌باشد. در جریان‌های غلیظ جریان ثانویه ایجاد شده منجر به نزدیک شدن سرعت بیشینه به دیواره بیرونی شده و حداکثر سرعت به سمت دیواره بیرونی منتقل می‌شود. این امر در پروفیل‌های عرضی سرعت در خم دوم و سوم نیز مشاهده می‌گردد. به‌طور کلی روی بستر متحرک در یک دبی ثابت با افزایش غلظت ورودی جریان غلیظ، سرعت بدنه جریان غلیظ هم افزایش می‌یابد. نکته حائز اهمیت در پروفیل‌های سرعت بدنه جریان این است که نرخ افزایش سرعت به ازای افزایش غلظت، به تغییرات فرم بستر وابسته است. با افزایش غلظت جریان غلیظ، تنش‌برشی بستر نیز افزایش یافته است. در شرایط بستر متحرک ذرات بستر فعال هستند و با افزایش سرعت و تشکیل فرم‌های بستر سبب افزایش زبری و مقاومت بستر جریان می‌شوند، به طوری‌که ذرات بستر به صورت نیروی مقاوم در مقابل جریان ورودی عمل می‌کنند. در نتیجه طبق نتایج حاصل شده باعث کاهش سرعت بدنه جریان تا حدود ۱۹ درصد هم خواهند شد. با توجه به نتایج در شرایط بستر متحرک عموماً با افزایش غلظت و در نتیجه افزایش سرعت جریان، قدرت جریان غلیظ نیز افزایش یافته است و سبب تغییر زبری بستر و افزایش تنش‌برشی بستر شده است. تا جایی‌که، با شسته شدن فرم بستر، زبری و تنش‌برشی نیز شروع به کاهش می‌کند.

در تمامی آزمایش‌ها سرعت پیشانی در شرایط بستر متحرک (با تشکیل فرم بستر) افزایش یافته است. انتظار می‌رود ذرات بستر به‌عنوان یک عامل مقاوم در مقابل جریان باشند اما در این آزمایش‌ها، ورود رسوبات کف از ناحیه زیر دماغه جریان غلیظ به داخل جریان، باعث افزایش ممنتوم جریان غلیظ و کاهش جریان‌های برگشتی در مقابل جریان و در نتیجه افزایش سرعت پیشانی تا حدود ۱۴ درصد شده‌اند. البته این مسئله، اهمیت تشکیل فرم بستر در ایجاد عامل مقاومت در مقابل جریان را به خوبی نشان می‌دهد. چون در ابتدای حرکت جریان غلیظ، فرم بستر هنوز تشکیل نشده است و عامل مقاومت و زبری بستر ناچیز است و در نتیجه اثر مقاومتی و کاهشی در برابر سرعت پیشانی جریان وجود نخواهد داشت. طبق نتایج آزمایش‌ها بر روی بستر متحرک با افزایش غلظت ورودی جریان غلیظ، سرعت بدنه جریان غلیظ هم افزایش می‌یابد. نکته حائز اهمیت در پروفیل‌های سرعت بدنه جریان این است که نرخ افزایش سرعت به ازای افزایش غلظت، به تغییرات فرم بستر وابسته است. در شیب صفر، با افزایش غلظت جریان غلیظ، تنش‌برشی بستر نیز افزایش یافته است، فرم بستر تشکیل شده است در نتیجه نرخ افزایش سرعت در غلظت ۲۵ گرم بر لیتر با افزایش تنش‌برشی کاهش یافته است (از حدود ۳۴ درصد به ۱۵ درصد رسید است). بنابراین نرخ افزایش سرعت با حذف فرم‌های بستر و کاهش زبری و تنش‌برشی بستر رخ خواهد داد. بدین ترتیب افزایش غلظت سبب افزایش قدرت جریان می‌گردد، به‌طوری‌که در ابتدا، زبری و تنش‌برشی بستر افزایش یافته و در ادامه مجدداً با حذف فرم‌های بستر کاهش می‌یابد .

تشکر و قدردانی

در پایان از اساتید محترم و مسئولان دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز به‌دلیل همکاری و حمایت مالی در طی انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Abad, J. D., O. E. Sequeiros, B. Spinewine, C. Pirmez, M. H. García, and Parker, G., 2011. Secondary current of saline underflow in a highly meandering channel: Experiments and theory. *Sediment Research, 81*, pp.787–813 .

2. Akiyama, J. And Stefan, H.G., 1984. Plunging flow into a reservoir. *Hydraulic Engineering, 110*, pp.484-499.

3. Corney, RKT., Peakall, J., Parsons, DR., Elliott, L., Amos, KJ., Best, JL., Keevil, GM. And Ingham, DB., 2006. The orientation of helical flow in curved channels. *Sedimentology, 53*, pp.249–257.

4. Ellison, T. H. and Turner, J. S., 1959. Turbulent entrainment in stratified flow. *Fluid Mechanics*, 6(3), pp.423 – 448.

5. Fernandez, R. L. and Imberger, J., 2006. Bed roughness induced entrainment in a high Richardson number underflow. *Hydraulic Research, 44*(6), pp.725-738.

6. Islam, M. A., and Imran, J., 2008. Experimental modeling of gravity underflow in a sinuous submerged channel. *Geophysics Research, 113*, pp.C07041-C07050.

7. Kaheh, M., 2012. Experimental investigation of Gravity Current Dynamics on Rough Beds. Ph.D. thesis, *Shahid Chamran University of Ahvaz*, Iran. (In Persian).

8. Kassem, A., and Imran, J., 2004. Three-dimensional modeling of density current. II: Flow in sinuous confined and unconfined channels. *Hydraulic Research, 42*(6), pp. 591– 602.

9. Keevil, G. M., Peakall, J., Best, J. L. and. Amos, K. J., 2006. Flow structure in sinuous submarine channels: Velocity and turbulence structure of an experimental submarine channel. *Marine Geology, 229*(3–4), pp.241–257.

10. Koti, F., 2009. Investigation of slope bed and Gravity Current discharge on water Stretch on Gravity Current. M.Sc. thesis, Faculty of Water Science Engineering, *Shahid Chamran University of Ahvaz*, Iran. (In Persian).

11. Morris, G.L., and Fan, J., 1998. *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dam, Reservoirs and Watersheds for Sustainable Use*. McGraw-Hill Press, McGraw-Hill, New York.

12. Parker, G., Garcia, M., Fukushima, Y. and Yu, W., 1987. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. *Hydraulic Research, 25*(1), pp.123-147.

13. Rastello, M., Ancey, C., Ousset, F., Magnard, R. and Hopfinger, E.J., 2002. An experimental study of particle-driven. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 2*, pp. 181–185.

14. Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Beaubouef, R. T., Sun, T., García, M. H. and Parker, G., 2010. Characteristics of velocity and excess density profiles of saline underflows and turbidity currents flowing over a mobile bed. *Hydraulic Engineering, 136*(7), pp.412–433.

15. Shafaie Bajestan, M., 2008. *Basic theory and practice of hydraulics of sediment transport*. Shahid Chamran University of Ahwaz Press, Shahid Chamran University of Ahwaz, Iran. (In Persian).

16. Turner, J.S., 1973. *Buoyancy effects in fluids*. Cambridge University Press, Cambridge, England.

17. Varjavand, P., 2013. Experimental investigation of Gravity Current Dynamics on Rough Beds. Ph.D. thesis, Faculty of Agriculture, *Tabriz University*. (In Persian).

نسخه نهایی-قبل از انتشار