

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر زبری بر روی پروفیل‌های سرعت و غلظت بدنه جریان غلیظ رسوبی

مهدی دریائی^۱، سید محمود کاشفی پور^{۲*} و مهدی قمشی^۲

^۱ دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲ استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده

در این تحقیق تأثیر زبری و شیب کف بر روی پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان غلیظ رسوبی در حالت زیر بحرانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان دادند که زبری تأثیر قابل توجهی بر روی شکل عمومی پروفیل سرعت به ویژه در ناحیه دیواره خواهد داشت. معادلاتی به منظور تعیین ضرایب و توان‌های معادلات تجربی پروفیل سرعت در جریان غلیظ برای دو ناحیه دیواره و جت با در نظر گرفتن زبری نسبی استخراج گردید که نتایج حاصل از تحلیل آماری آن‌ها تطابق قابل قبولی را با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نشان دادند. همچنین درصد تغییرات مشخصه‌های پروفیل سرعت و غلظت نیز با در نظر گرفتن زبری نسبت به حالت بدون زبری محاسبه گردید. بررسی پروفیل‌های غلظت نشان داد که زبری تأثیر قابل توجهی روی پروفیل غلظت نیز داشته است.

واژگان کلیدی: جریان غلیظ رسوبی، پروفیل سرعت و غلظت، بدنه جریان غلیظ، زبری.

۱- مقدمه

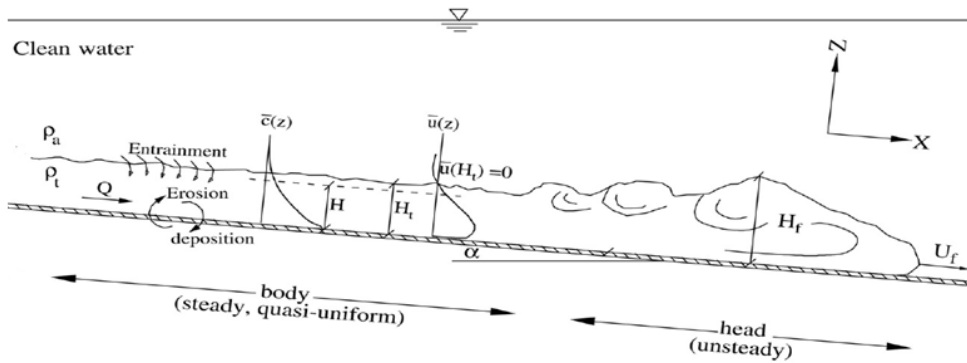
انجام دادند. Akiyama و Stefan [۹] بر روی فرسایش و رسوبگذاری در جریان‌های کدر مطالعاتی انجام دادند. Parker و همکاران [۱۰] و Garcia و Parker [۱۱] بر روی تشکیل فرم بستر با استفاده از جریان غلیظ نمکی مطالعاتی انجام دادند. Imran و Islam [۱۲] مطالعات آزمایشگاهی بر روی سرعت متوسط و ساختار تلاطم جریان‌های کدر پایستار انجام دادند. آن‌ها در انجام آزمایشات از سرعت سنج آکوستیک استفاده نمودند و با استفاده از نتایج حاصل سرعت متوسط، انرژی جنبشی توربولانت و تنش‌های رینولدزی را استخراج نمودند. Pritchard و Gladstone [۱۳] بر روی الگوهای ته‌نشینی در جریان‌های کدر مطالعاتی انجام دادند. Sequeiros و همکاران [۱۴] بر روی مشخصات سرعت جریان غلیظ نمکی و رسوبی بر روی بستر متحرک مطالعاتی انجام دادند. آن‌ها در آزمایشات خود دو رژیم جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی را در نظر گرفتند. نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها نشان دادند که بسته به رژیم جریان با گذشت زمان ممکن است بستر بدون تغییر مانده یا فرم بستر تشکیل شود که بر روی پروفیل عمودی سرعت تأثیرگذار خواهد بود.

جریان غلیظ جریانی با چگالی ρ_t است که ذاتاً به دلیل اثر اختلاف چگالی دو سیال بر روی شتاب جاذبه به وجود می‌آید. شتاب ثقل مؤثر بر جریان که به عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح می‌باشد به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$g' = g \frac{(\rho_t - \rho_a)}{\rho_a} \quad (۱)$$

که در این رابطه، g' شتاب ثقل کاهش یافته، ρ_a دانسیته سیال پیرامون و ρ_t دانسیته سیال غلیظ می‌باشد. در شکل (۱) شماتیکی از حرکت جریان غلیظ رسوبی ارائه شده است.

مطالعات بسیاری در خصوص شناخت پدیده جریان غلیظ صورت پذیرفته و روابط تجربی و تئوری زیادی جهت پیش‌بینی خصوصیات آن ارائه گردیده است. Turner و Ellison [۱]، Lofquist [۲]، Middleton [۳]، Altinakar و همکاران [۴]، Kneller و همکاران [۵] و Buckee و همکاران [۶] در خصوص اندازه‌گیری پروفیل سرعت بدنه جریان غلیظ به صورت آزمایشگاهی مطالعاتی انجام دادند. Xu و همکاران [۷] پروفیل سرعت را در شرایط صحرایی برداشت نمودند. Li و همکاران [۸] بر روی سرعت پیشانی جریان غلیظ در مقاطع متغیر مطالعاتی



شکل ۱- شماتیکی از حرکت جریان غلیظ

ناحیه دیواره) و قسمت دوم از h_{\max} تا h_t (ناحیه جت). آشفتگی جریان در ناحیه دیواره ناشی از تأثیر بستر می‌باشد. همچنین رسوبگذاری در این ناحیه صورت می‌پذیرد. در صورتی که آشفتگی در ناحیه جت ناشی از اصطکاک جریان با سیال پیرامون می‌باشد [۴].

با توجه به این که تفکیک مرز جریان غلیظ از سیال پیرامون تا اندازه‌ای مشکل می‌باشد، لذا روابط زیر به منظور تخمین ارتفاع، سرعت و غلظت متوسط بدنه جریان غلیظ مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]:

$$Uh = \int_0^{\infty} u dz = \int_0^{h_t} u dz \quad (2)$$

$$U^2 h = \int_0^{\infty} u^2 dz = \int_0^{h_t} u^2 dz \quad (3)$$

$$C_s U h = \int_0^{\infty} (u c_s) dz = \int_0^{h_t} (u c_s) dz \quad (4)$$

حرکت جریان غلیظ رسوبی علاوه بر انتقال رسوبات موجب فرسایش بستر نیز می‌شود. نظر به این که عامل اصلی فرسایش، تنش برشی بوده و این پارامتر نیز تابعی از تغییرات سرعت در عمق می‌باشد، لذا مطالعه در خصوص پروفیل سرعت در جریان-های غلیظ امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. لذا هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر زبری بر روی مشخصات پروفیل سرعت و غلظت در جریان غلیظ رسوبی می‌باشد.

۲- مشخصات پروفیل سرعت و غلظت در جریان غلیظ

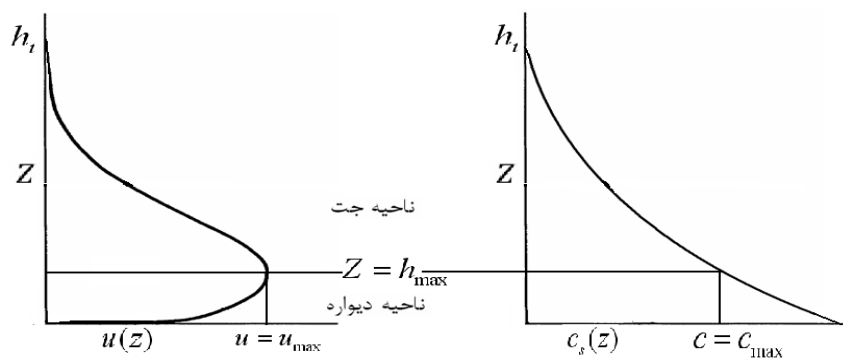
شکل عمومی پروفیل سرعت و غلظت در شکل (۲) ارائه شده است. مشخصه‌های مهم موجود در این پروفیل‌ها عبارتند از: u_{\max} : سرعت ماکزیمم،

h_{\max} : ارتفاع متناظر با سرعت ماکزیمم

C_{\max} : غلظت متناظر برای سرعت ماکزیمم و

h_t : ارتفاعی که در آن سرعت و غلظت صفر می‌شوند.

چرا که فرض بر این است، سیال پیرامون در حال سکون و آب تمیز می‌باشد. با توجه به پروفیل سرعت بدنه جریان غلیظ را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد. قسمت اول از بستر تا h_{\max}



شکل ۲- شماتیکی از پروفیل سرعت و غلظت در جریان غلیظ

جدول ۱- نسبت‌های مشخصه‌های پروفیل سرعت و غلظت [۴]

$\frac{c_b}{C_{max}}$	$\frac{c_b^*}{C_s}$	$\frac{h_{max}}{h}$	$\frac{u_{max}}{U}$	$\frac{h_t}{h}$
۲	۱/۴	۰/۳	۱/۳	۱/۳

۳- مواد و روش‌ها

آزمایشات در فلومی به طول ۷۸۰ سانتی‌متر، عرض ۳۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز انجام پذیرفت. ۴ اندازه ارتفاع زبری شامل (۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی-متر) و ۴ شیب (۰، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ درصد) برای این آزمایشات در نظر گرفته شد. همچنین در کلیه آزمایشات دو غلظت ۱۰ گرم در لیتر ($\rho_t = 1008 \text{ kg/m}^3$) و ۲۰ گرم در لیتر ($\rho_t = 1017 \text{ kg/m}^3$) از جریان غلیظ رسوبی مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع ۳۲ سری آزمایش انجام شد. فلوم و تجهیزات مورد استفاده در شکل (۳) نشان داده شده است. جهت انجام آزمایشات ابتدا جریان غلیظ با مخلوط کردن آب و پودر سنگ به غلظت دلخواه درون مخزن شماره ۱ تهیه و توسط پمپ به مخزن شماره ۲ به منظور رسیدن به هد ثابت منتقل می‌شد، سپس با استفاده از یک شیر و دبی سنج الکترومغناطیس میزان جریان ورودی به درون فلوم کنترل می‌گردید. اندازه متوسط ذرات (D_{50}) در حدود ۱۷ میکرومتر و ضریب یکنواختی ($\delta = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}}$) در حدود ۴/۵ می‌باشد که نشان‌دهنده غیر یکنواخت بودن مصالح مورد استفاده می‌باشد.

پروفیل سرعت جریان غلیظ توسط دستگاه DOP2000 اندازه‌گیری می‌شد. این دستگاه تنها مؤلفه افقی از بردار سرعت را در عمق اندازه‌گیری می‌کند. دستگاه شامل پروب‌های ساطع کننده و دریافت کننده سیگنال می‌باشد که به آن‌ها مبدل سیگنال گفته می‌شود. این دستگاه قادر به برداشت تعداد ۱۵۰ عدد سرعت لحظه‌ای در هر فاصله از پروب می‌باشد. در انجام آزمایشات پروب در ۳/۳۰ از درجه ورودی جریان غلیظ به درون فلوم قرار گرفت.

نظر به این که اهداف تحقیق حاضر بررسی تأثیر زبری در ناحیه دیواره بر روی خصوصیات پروفیل سرعت و غلظت می‌باشد لذا برای تعیین ارتفاعات زبری، ابتدا آزمایشی که در آن کمترین z_{max} شکل بگیرد با شیب طولی ۳/۵ درصد و غلظت ۲۰ گرم در

لیتر ($\rho_t = 1017 \text{ kg/m}^3$) انجام شد.

که در این روابط:

U : سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ،

h : ارتفاع بدنه جریان غلیظ،

C_s : غلظت متوسط بدنه جریان غلیظ،

u : سرعت بدنه در هر فاصله از کف و

c_s : غلظت بدنه در هر فاصله از کف می‌باشد.

رابطه‌ای که توزیع سرعت در ناحیه دیواره را بیان می‌کند به

صورت زیر می‌باشد [۴]:

$$\frac{u(z)}{u_{max}} = \left(\frac{z}{h_{max}}\right)^n \quad (5)$$

توزیع سرعت در ناحیه جت از یک معادله شبه گوسین به

صورت زیر پیروی می‌کند [۴]:

$$\frac{u(z)}{u_{max}} = \exp\left[-\alpha_c \left(\frac{z-h_{max}}{h-h_{max}}\right)^m\right] \quad (6)$$

پروفیل غلظت در ناحیه دیواره از رابطه تجربی مشابه پروفیل

سرعت در این ناحیه تبعیت می‌کند [۱۵]:

$$\frac{c_s(z)}{C_{max}} = \left(\frac{z}{h_{max}}\right)^{-\psi} \quad (7)$$

همچنین توزیع غلظت در ناحیه جت از یک معادله شبه

گوسین مشابه توزیع سرعت در این ناحیه به صورت زیر پیروی

می‌کند [۱۵]:

$$\frac{c_s(z)}{C_{max}} = \exp\left[-\beta_c \left(\frac{z-h_{max}}{h-h_{max}}\right)^{\lambda_c}\right] \quad (8)$$

در این روابط: u_* سرعت برشی، k ، n ، cte ، α_c ، m ،

β_c و λ_c ضرایب ثابت می‌باشند.

Altinakar و همکاران [۴] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی

نسبت‌های مشخصه‌های پروفیل سرعت و غلظت را به صورت

ارائه شده در جدول (۱) بیان کردند.

جریان غلیظ در تمام آزمایشات بر اساس عدد فرود دنسیمیتریک (رابطه (۹)) در حالت زیر بحرانی قرار داشته باشد ($Fr_d < 1$).

$$Fr_d = \frac{u}{\sqrt{g' h \cos \theta}} \quad (9)$$

در این رابطه θ شیب کف بستر می‌باشد.

از جمله پارامترهای بدون بعد دیگر در جریان غلیظ که به منظور تعیین پایداری جریان غلیظ در مقابل اختلاط با سیال پیرامون استفاده می‌شود، عدد ریچاردسون می‌باشد. این عدد معکوس عدد فرود دنسیمیتریک در جریان غلیظ می‌باشد.

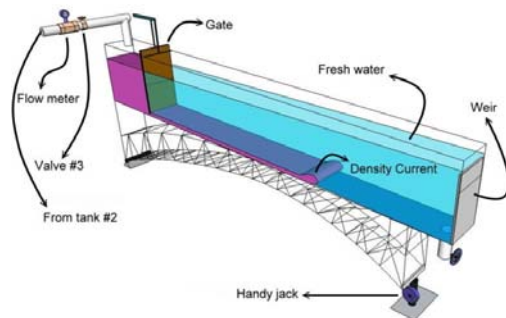
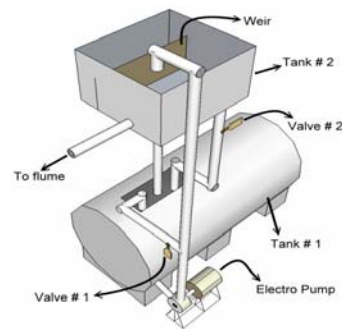
به منظور تعیین عدد رینولدز جریان از رابطه (۱۰) استفاده گردید.

$$Re = \frac{\rho_l U h}{\mu} \quad (10)$$

در این رابطه ρ_l جرم واحد حجم اولیه جریان غلیظ و μ لزوجت دینامیکی جریان غلیظ می‌باشد.

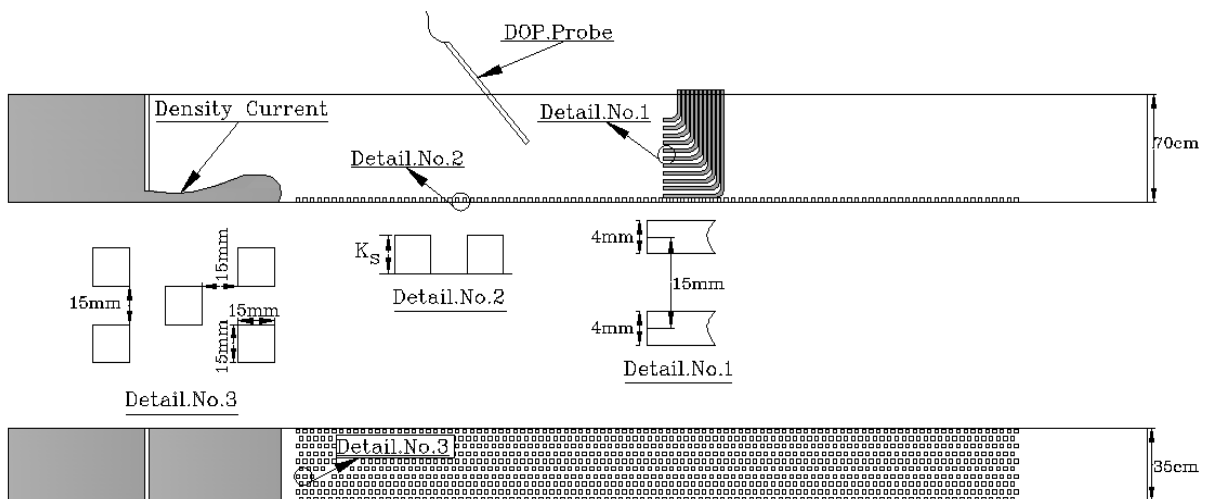
مقطع زبری‌ها مربعی به اندازه $1/5 \times 1/5$ سانتی‌متر مربع و آرایش آن‌ها به صورت زیگزاگ با فاصله طولی و عرضی $1/5$ سانتی‌متر از همدیگر بوده است.

به منظور برداشت پروفیل غلظت بدنه جریان غلیظ لوله‌هایی به قطر ۴ میلی‌متر تهیه و در $3/5$ متری از ابتدای ورودی جریان غلیظ به درون فلوم نصب گردید. این لوله‌ها مطابق شکل (۴) به هم متصل شدند. به نحوی که فاصله مرکز لوله‌ها از هم 15 میلی‌متر باشد.



شکل ۳- نمایی از مخزن و فلوم

بلندترین ارتفاع زبری مورد استفاده در این تحقیق از z_{max} در این حالت کمتر در نظر گرفته شده است. z_{max} برای شرایط این آزمایش معادل $1/7$ سانتی‌متر حاصل شد. در نتیجه برای این که کلیه زبری‌ها در ناحیه دیواره قرار بگیرند ماکزیمم ارتفاع زبری برابر $1/5$ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و سایر ارتفاعات زبری ($0, 1/5, 2/5, 3/5$) بر مبنای آن انتخاب گردید. شیب‌های مورد استفاده در آزمایشات ($0, 1/5, 2/5, 3/5$ درصد) بوده‌اند. انتخاب این شیب‌ها به گونه‌ای بوده است که



شکل ۴- شماتیکی از تجهیزات اندازه‌گیری سرعت و غلظت

در شکل‌های (۵) و (۶) پروفیل‌های سرعت رسم شده‌اند. همان طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود زبری باعث افزایش ارتفاع بدنه جریان غلیظ می‌شود. دلیل این پدیده را می‌توان این گونه بیان کرد که کاهش شتاب ثقل در جریان غلیظ (رابطه (۱)) منجر به سبک شدن آن می‌شود. در نتیجه وجود زبری در مسیر جریان باعث می‌شود هنگام برخورد، ارتفاع بدنه جریان افزایش یابد. از جمله عوامل دیگر در افزایش ارتفاع بدنه جریان غلیظ، کشش سیال پیرامون می‌باشد. همچنین همان طور که در این شکل مشخص است در هر شیب و هر غلظت، افزایش ارتفاع زبری به واسطه ایجاد مقاومت در مقابل جریان منجر به کاهش سرعت ماکزیمم در پروفیل سرعت شده است. یکی دیگر از مواردی که می‌توان با توجه به این شکل‌ها برداشت نمود کاهش تغییرات سرعت نسبت به ارتفاع (du/dh) با افزایش ارتفاع زبری می‌باشد. نظر به این که عامل مهم فرسایش بستر تنش برشی (τ) می‌باشد و تنش برشی ارتباط مستقیم با تغییرات سرعت نسبت به ارتفاع ($\tau \propto du/dh$) دارد، لذا به نظر می‌رسد ساخت زبری در کف منجر به کاهش فرسایش بستر ناشی از عبور جریان غلیظ شود.

از انتهای هر لوله توسط سرنگ با حجم مشخص ۵۰ میلی-لیتر نمونه‌برداری انجام شد. نمونه‌ها بعد از برداشت در ظروف آزمایشگاهی که قبلاً وزن شده بودند ریخته شده و به مدت ۲۴ ساعت درون دستگاه آون قرار گرفتند. بعد از خشک شدن و توزین مجدد با مشخص بودن وزن رسوب موجود در نمونه و حجم نمونه، غلظت در هر ارتفاع حاصل می‌شد. در شکل (۴) به صورت شماتیک زبری، تجهیزات اندازه‌گیری سرعت و غلظت نشان داده شده است.

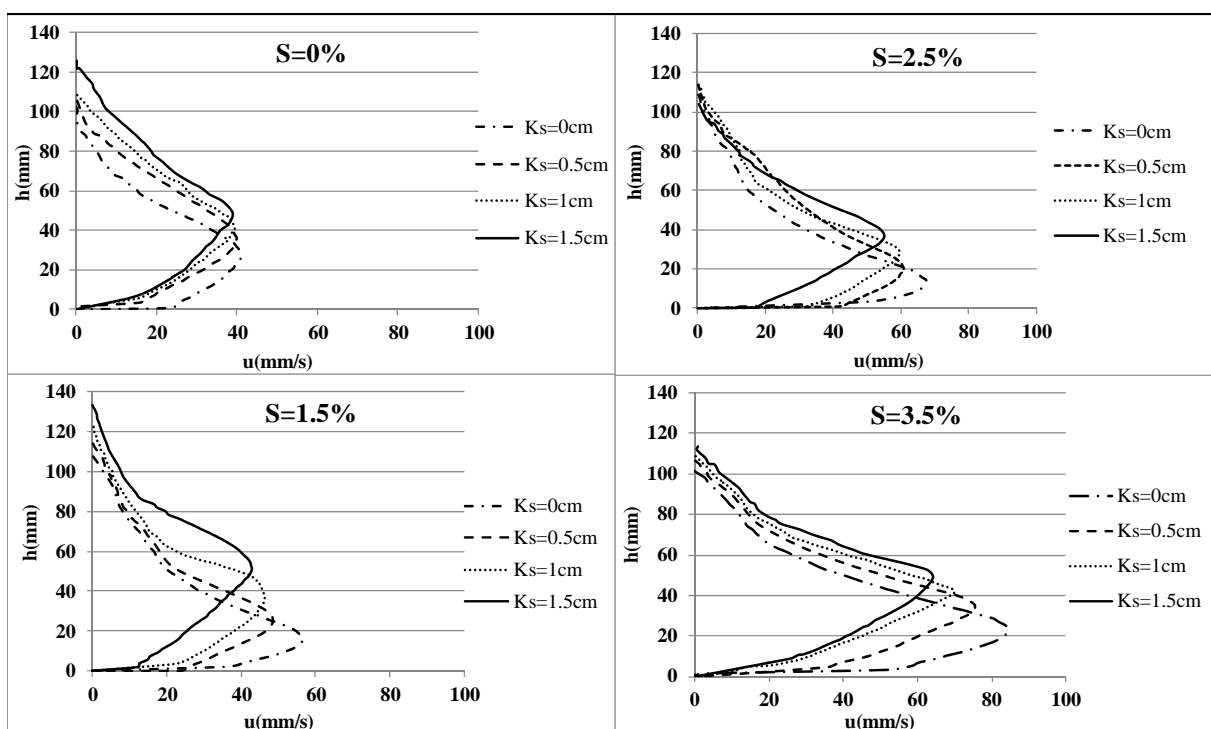
۴- نتایج و بحث

در جدول (۲) محدوده اعداد رینولدز و فرود دنسیمیتریک برای پیشانی و بدنه جریان غلیظ ارائه شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود در تحقیق حاضر تمامی آزمایشات در حالت زیر بحرانی و آشفته قرار دارند.

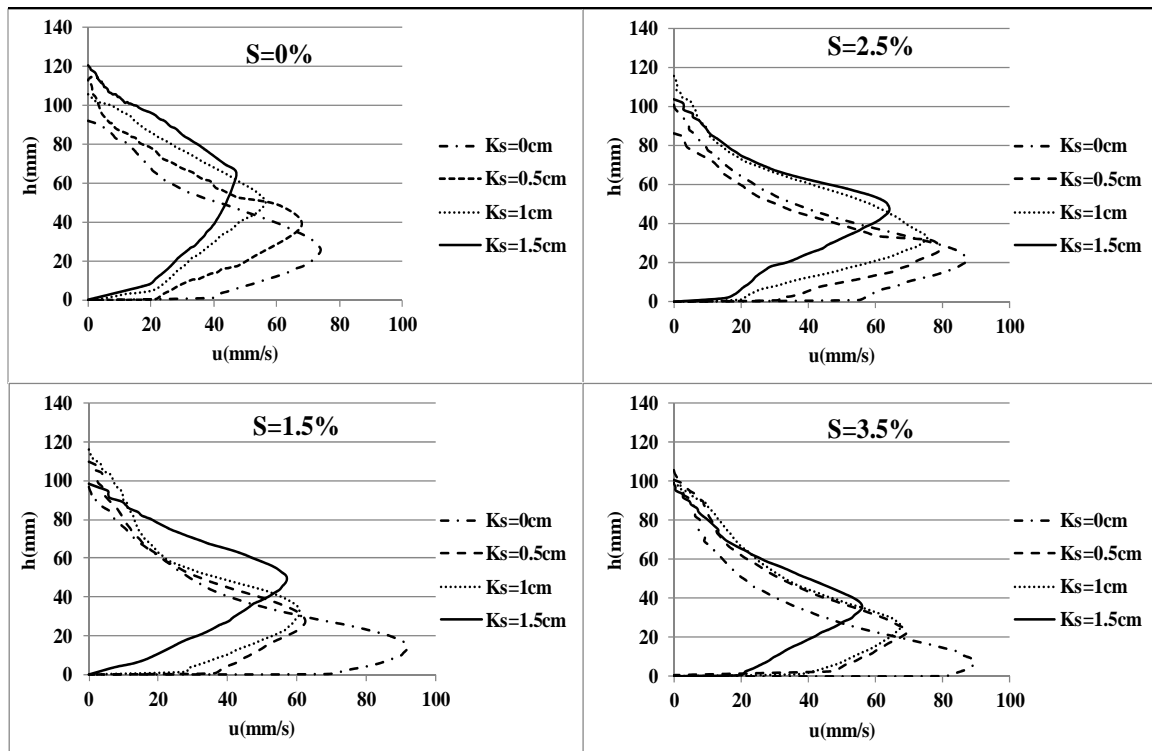
جدول ۲- محدوده اعداد فرود دنسیمیتریک و رینولدز پیشانی و

بدنه جریان غلیظ در آزمایشات

Re		Fr_d		
حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	
۴۹۰۸	۲۲۷۰	۰/۸	۰/۳	پیشانی جریان
۳۶۰۰	۲۱۰۰	۰/۷	۰/۲	بدنه جریان



شکل ۵- پروفیل‌های سرعت برای غلظت ۱۰ گرم در لیتر ($\rho_t = 1008 \text{ kg/m}^3$)



شکل ۶- پروفیل‌های سرعت برای غلظت ۲۰ گرم در لیتر ($\rho_t = 1017 \text{ kg/m}^3$)

جدول ۳- نسبت مشخصه‌های پروفیل سرعت در حالت

$K_s = 0 \text{ cm}$ (تحقیق حاضر)

$\frac{h_{\max}}{h}$	$\frac{u_{\max}}{U}$	$\frac{h_t}{h}$
۰/۲۹	۱/۴۱	۱/۵۴

درصد تغییرات ناشی از به کار بردن زبری در ناحیه دیواره تا ارتفاع ۱/۵ سانتی‌متر بر روی مشخصه‌های پروفیل سرعت نسبت به حالت بدون زبری محاسبه و در جدول (۴) ارائه گردیده است. با توجه به این جدول ملاحظه می‌گردد که به کار بردن زبری تا ارتفاع ۱/۵ سانتی‌متر در هر شیب تأثیر چندانی بر روی تغییرات مشخصه u_{\max}/U ندارد. این تغییرات در حدود ۲ درصد و به صورت افزایشی می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود مشخصه h_t/h دارای تغییراتی در حدود ۵ درصد و به صورت کاهش می‌باشد. حال آن که مشخصه h_{\max}/h با تغییراتی در حدود ۹۶ درصد و به صورت افزایشی بیشترین میزان تغییر را دارا می‌باشد. دلیل تفاوت قابل توجه تغییرات h_{\max}/h نسبت به تغییرات u_{\max}/U و h_t/h را می‌توان این گونه توجیه کرد که به کار بردن زبری تا ۱/۵ سانتی‌متر منجر به افزایش ارتفاع محل وقوع سرعت بیشینه

همان‌طور که عنوان شد عامل اصلی حرکت جریان غلیظ، اختلاف غلظت آن با سیال پیرامون می‌باشد. با کاهش فرسایش بستر از تغذیه جریان غلیظ توسط مصالح کف کاسته می‌شود. این موضوع منجر به کاهش غلظت جریان غلیظ در مسیر حرکت و در نتیجه کاهش اختلاف غلظت سیال پیرامون و جریان غلیظ شده و لذا می‌توان این گونه برداشت نمود که وجود زبری در بستر با کاستن سرعت جریان غلیظ به واسطه ماهیت مقاومتی خود و کاهش فرسایش بستر، از اثرات مخرب حرکت جریان غلیظ مانند کاهش عمر مفید سدها به واسطه رسوبگذاری در مخازن آن‌ها و وارد آمدن خسارت به تأسیسات جانبی سدها جلوگیری می‌کند.

همان‌طوری که در این شکل‌ها ملاحظه می‌گردد، زبری باعث تغییر شکل پروفیل سرعت در جریان غلیظ می‌شود. نسبت مشخصه‌های اصلی سرعت در حالت $K_s = 0 \text{ cm}$ (بدون زبری)، در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این نسبت‌ها با نسبت‌های حاصل از نتایج سایر محققین تقریباً مشابهت دارد. دلیل اختلاف در این حالت را می‌توان مربوط به شرایط آزمایشگاه و خصوصیات متفاوت مواد به کار برده در تهیه جریان غلیظ دانست.

(۲) درصد خطا (%E) که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\% E = \frac{\sum_{i=1}^N |X_{mi} - X_{pi}|}{\sum_{i=1}^N X_{mi}} \times 100 \quad (14)$$

(۳) متوسط مجذور مربعات خطا (RMSE) که به صورت زیر تعریف شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{mi} - X_{pi})^2}{N}} \quad (15)$$

که در این روابط، N تعداد داده‌ها، X_m متغیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و X_p متغیر پیش‌بینی شده توسط فرمول می‌باشد. در هر فرمول که مقادیر محاسبه شده برای %E و RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت آن بالاتر است. خلاصه نتایج تحلیل آماری در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵- نتایج حاصل از تحلیل آماری در روال تست روابط

(۱۱) تا (۱۳)

RMSE	%E	α	R^2	
۰/۰۹	۱۶	۰/۸۴	۰/۶۴	رابطه (۱۱)
۰/۱۲	۷	۰/۹۹	۰/۸۱	رابطه (۱۲)
۰/۱۱	۶	۰/۹۹	۰/۷۷	رابطه (۱۳)

با توجه به جدول فوق مشاهده می‌شود که این روابط دقت نسبتاً قابل قبولی در پیش‌بینی ضرایب و توان‌های معادلات پروفیل سرعت در دو ناحیه دیواره و جت به صورت تابعی از زبری نسبی را دارا می‌باشند. در شکل (۷) با استفاده از روابط (۱۱) تا (۱۳) و رسم پروفیل بدون بعد سرعت در حالت بدون زبری ($K_s = 0 \text{ cm}$) مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از تحقیقات Altinakar و همکاران [۴]، Hosseini و همکاران [۱۵] و نتایج حاصل از تحقیق حاضر صورت گرفت.

(h_{\max}) به صورت قابل توجهی نسبت به سایر مشخصه‌های پروفیل سرعت می‌شود.

همان‌طور که مشاهده شد، زبری تأثیر بسزایی بر روی شکل پروفیل سرعت دارد. لذا منطقی به نظر می‌رسد بر روی معادلات پروفیل سرعت در دو ناحیه دیواره و جت نیز تأثیرگذار باشد. به همین جهت با این فرض که شکل عمومی معادلات ثابت است، ابتدا با استفاده از معادلات (۵) و (۶) و نتایج به دست آمده در آزمایشگاه، ضرایب و توان‌های این معادلات برای تمامی حالات محاسبه گردید.

جدول ۴- درصد تغییرات مشخصه‌های پروفیل سرعت با ارتفاع

زبری ۱/۵ سانتی‌متر نسبت به حالت بدون زبری

$\frac{h_{\max}}{h}$	$\frac{u_{\max}}{U}$	$\frac{h_t}{h}$
+۹۶	+۲	-۵

سپس با استفاده از ۷۰ درصد اطلاعات موجود روابطی به منظور تعیین این ضرایب و توان‌ها به صورت تابعی از زبری نسبی (k_s/h) در دو ناحیه دیواره و جت ارائه شد. همچنین ۳۰ درصد اطلاعات باقی‌مانده نیز جهت بررسی دقت روابط ارائه شده مورد استفاده قرار گرفت.

$$n = 0.23e^{5.27 \frac{k_s}{h}} \quad (11)$$

$$\alpha_c = 1.75e^{-2.74 \frac{k_s}{h}} \quad (12)$$

$$m = 1.11e^{2.37 \frac{k_s}{h}} \quad (13)$$

روابط فوق برای شرایط زیر بحرانی، متلاطم، محدوده عدد ریچاردسون (۰/۷-۵/۶) و محدوده شیب (۰-۳/۵ درصد) معتبر می‌باشد.

به منظور بررسی دقت روابط (۱۱) تا (۱۳) از روش‌های آماری که در زیر ارائه شده‌اند استفاده گردید:

(۱) R^2 و α که به ترتیب عبارتند از مجذور ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون ($\alpha = X_m/X_p$). دقت پیش‌بینی هر رابطه به پارامترهای فوق بستگی دارد. بدین صورت که هرچه R^2 و α به یک نزدیک‌تر باشند، رابطه بهتر می‌تواند مقادیر ضریب شدت اختلاط را تخمین بزند.

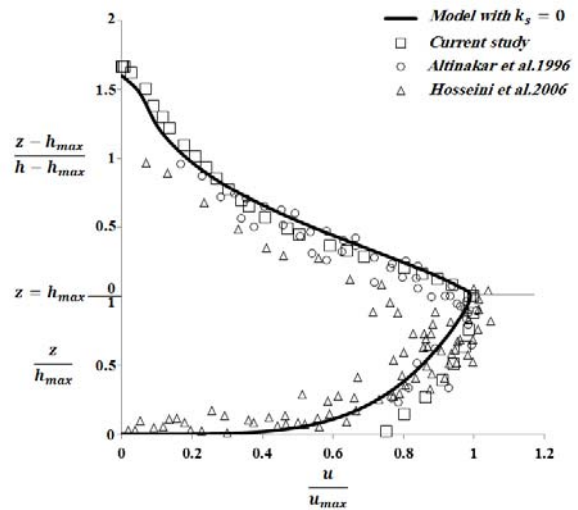
سرعت جریان غلیظ به واسطه وجود زبری منجر به ته‌نشینی رسوبات شده که این موضوع باعث کاهش غلظت در عمق می‌شود. لذا منطقی به نظر می‌رسد که با افزایش ارتفاع زبری میزان کاهش سرعت و به دنبال آن میزان نشست رسوبات و کاهش غلظت در عمق افزایش یابد. نسبت مشخصه‌های اصلی غلظت در حالت $K_s = 0 \text{ cm}$ (بدون زبری)، در جدول (۶) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این نسبت‌ها با نسبت‌های حاصل از نتایج سایر محققین تقریباً مشابهت دارد. دلیل اختلاف در این حالت را نیز می‌توان مربوط به شرایط آزمایشگاه و خصوصیات متفاوت مصالح به کار برده در تهیه جریان غلیظ دانست.

جدول ۶- نسبت مشخصه‌های پروفیل غلظت در حالت

$K_s = 0 \text{ cm}$ (تحقیق حاضر)

c_b / C_{\max}	c_b / C_s
۱/۵۶	۱/۵۵

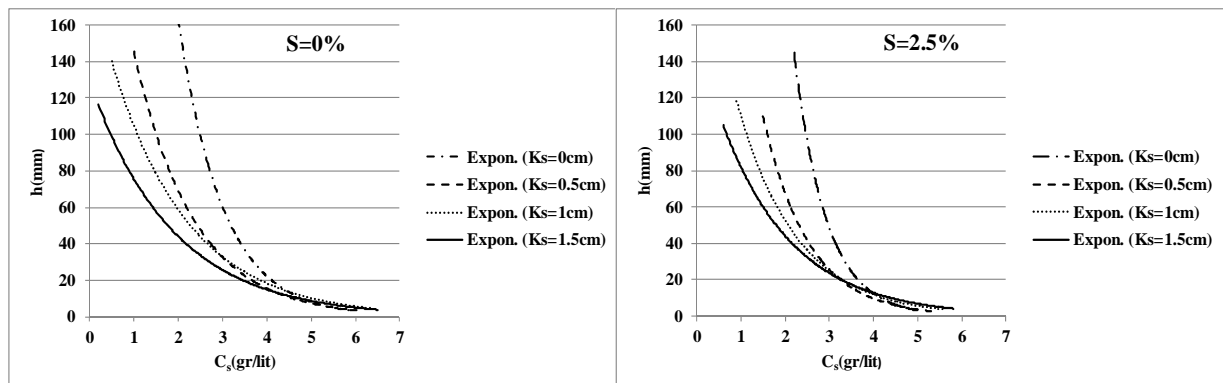
درصد تغییرات ناشی از به کار بردن زبری در ناحیه دیواره تا ارتفاع ۱/۵ سانتی‌متر بر روی مشخصه‌های پروفیل غلظت نسبت به حالت بدون زبری محاسبه و در جدول (۷) ارائه گردیده است



شکل ۷- مقایسه مدل ارائه شده با استفاده از روابط (۱۱) تا (۱۳) در حالت بدون زبری و تحقیقات سایرین

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از این تحقیق تقریباً با نتایج حاصل از محققین مذکور مشابه می‌باشد. دلیل اختلاف موجود بین نتایج را می‌توان به اختلاف در مواد مورد استفاده و شرایط متفاوت انجام آزمایشات دانست. به منظور بررسی تأثیر زبری بر روی پروفیل غلظت، در دو شیب ۰ و ۲/۵ درصد با غلظت ۱۰ گرم در لیتر اقدام به برداشت پروفیل غلظت در ارتفاعات زبری مورد نظر گردید. نتایج حاصل در شکل (۸) ارائه شده است.

خطوط برازش داده شده با توجه به معادله (۸) به صورت نمایی می‌باشند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع زبری از غلظت جریان در عمق کاسته می‌شود. دلیل این پدیده را می‌توان این‌گونه عنوان کرد که کاهش



شکل ۸- پروفیل‌های غلظت برای غلظت ۱۰ گرم در لیتر ($\rho_t = 1008 \text{ kg/m}^3$)

- وجود زبری به دلیل کاهش سرعت جریان غلیظ، ته‌نشینی رسوبات و کاهش غلظت در عمق را به همراه خواهد داشت.
- تغییرات ناشی از وجود زبری بر روی c_b/C_s +۴۰ درصد و بر روی c_b/C_{max} +۴۷ درصد می‌باشد که با توجه به توضیحات فوق می‌توان دلیل آن را افزایش C_b و کاهش C_s و C_{max} به واسطه افزایش ارتفاع زبری دانست.

۶- مراجع

- [1] Ellison, T. H., Turner, J. S., "Turbulent Entrainment in Stratified Flows", Journal of Fluid Mechanics 1959, 6 (3), 423-448.
- [2] Lofquist, K., "Flow and Stress near an Interface between Stratified Liquids", Physics of Fluids, 1960, 3, 158.
- [3] Middleton, G. V., "Sediment Deposition from Turbidity Currents", Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1993, 21, 89-114.
- [4] Altinakar, M. S., Graf, W. H., Hopfinger, E. J., "Flow Structure in Turbidity Currents", Journal of Hydraulic Research, 1996, 34 (5), 713-718.
- [5] Kneller, B. C., Bennett, S. J., McCaffrey, W. D., "Velocity Structure, Turbulence and Fluid Stresses in Experimental Gravity Currents", Journal of Geophysical Research, 104 (C3), 1999, 5381-5391.
- [6] Buckee, C., Kneller, B., Peakall, J. "Turbulence Structure in Steady", Solute-Driven Gravity Currents, Blackwell, Oxford, UK, 2009, pp 173-187.
- [7] Xu, J. P., Noble, M. A., Rosenfeld, L. K., "In-Situ Measurements of Velocity Structure within Turbidity Currents", Geophysical Research Letters, 2004, 31 (9), 16-31.
- [8] Li, T., Zhang, J. H., Tan, G. M., Ma, H. B., Li, S. X., "Study on Turbidity Current Head Going Through the Changing Width Section. Procedia Environmental Sciences", 2012, 13, 214-220.
- [9] Akiyama, J., Stefan, H., "Turbidity Current with Erosion and Deposition", Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 111 (12), 1473-1496.
- [10] Parker, G., Garcia, M., Fukushima, Y., Yu, W., "Experiments on Turbidity Currents Over an Erodible Bed", Journal of Hydraulic Research, 1987, 25 (1), 123-147.
- [11] Garcia, M., Parker, G., "Experiments on the Entrainment of Sediment into Suspension by a Dense Bottom Current", Journal of

با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که تغییرات میزان مشخصه c_b/C_s حدود ۴۰ درصد و به صورت افزایشی و مشخصه c_b/C_{max} نیز در حدود ۴۷ درصد و به صورت افزایشی می‌باشد که با توجه به توضیحات فوق می‌توان دلیل آن را افزایش C_b و کاهش C_s و C_{max} به واسطه افزایش ارتفاع زبری دانست.

جدول ۷- درصد تغییرات مشخصه‌های پروفیل غلظت با ارتفاع

زبری ۱/۵ سانتی‌متر نسبت به حالت بدون زبری

c_b/C_{max}	c_b/C_s
+۴۷	+۴۰

لازم به ذکر است به دلیل این که جهت رسم پروفیل‌های غلظت در هر حالت تنها از ۱۰ نقطه در عمق نمونه‌برداری صورت گرفته است، لذا به دلیل کم بودن داده‌ها در دو ناحیه دیواره و جت، ضرایب و توان‌ها در معادلات (۷) و (۸) تعیین نگردید.

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تأثیر زبری در ناحیه دیواره بر روی مشخصات پروفیل‌های سرعت و غلظت جریان غلیظ رسوبی در حالت زیر بحرانی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور با در نظر گرفتن ۴ شیب (۰، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ درصد)، ۴ اندازه ارتفاع زبری (۰، ۱/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر) و در نظر گرفتن دو غلظت ۱۰ گرم در لیتر ($\rho_t = 1008 \text{ kg/m}^3$) و ۲۰ گرم در لیتر ($\rho_t = 1017 \text{ kg/m}^3$) از جریان غلیظ رسوبی در مجموع ۳۲ سری آزمایش انجام و نتایج زیر حاصل گردید:

- وجود زبری بر روی شکل عمومی پروفیل سرعت به خصوص در ناحیه دیواره تأثیر بسزایی دارد.
- افزایش ارتفاع زبری منجر به کاهش du/dh در پروفیل سرعت می‌شود که به نظر می‌رسد این موضوع منجر به کاهش فرسایش بستر می‌شود.
- زبری بر روی مقدار ضرایب و توان‌های معادلات تجربی پروفیل سرعت تأثیر قابل توجهی دارد.
- بیشترین میزان تأثیر افزایش زبری بر روی h_{max}/h (۹۶+ درصد) می‌باشد. حال آن که این تغییرات بر روی u_{max}/U (۲+ درصد و بر روی h_t/h -۵ درصد) دلیل این تفاوت در تغییرات افزایش h_{max} به صورت قابل توجهی نسبت به سایر مشخصه‌های پروفیل سرعت می‌باشد.

- Geophysical Research, Oceans 98, no. C3, 1993, 4793-4807.
- [12] Islam, M. A., Imran, J., "Vertical Structure of Continuous Release Saline and Turbidity Currents", *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 2010, 115 (C8), 3357-3369.
- [13] Gladstone, C., Pritchard, D., "Patterns of Deposition from Experimental Turbidity Currents with Reversing Buoyancy" *Sedimentology*, 2010, 57 (1), 53-84.
- [14] Sequeiros, O. E., Spinewine, B., Beaubouef, R. T., Sun, T., García, M. H., Parker, G., "Characteristics of Velocity and Excess Density Profiles of Saline Underflows and Turbidity Currents Flowing Over a Mobile Bed", *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 136 (7), 412-433.
- [15] Hosseini, S. A., Shamsai, A., Ataie-Ashtiani, B., "Synchronous Measurements of the Velocity and Concentration in Low Density Turbidity Currents using an Acoustic Doppler Velocimeter", *Flow Measurement and Instrumentation*, 2006, 17 (1), 59-68.

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Study of the Effect of Roughness on the Velocity and Concentration Profiles of Sedimentary Density Current Body

Mehdi Daryaei, Seyed Mahmoud Kashefipour *, Mehdi Ghomshi

Faculty of Water Sciences and Engineering, University of Shahid Chamran, Ahwaz 6135783151, Iran

Received: 22 June 2014; Accepted: 14 March 2015

Keywords:

Sedimentary density current, Velocity and concentration profiles, Density current body, Roughness

1. Introduction

One of the most important phenomena in the nature with many undesirable effects for the environment is density current. Density or gravity current is a flow with a density of ρ_t , which is higher than the ambient fluid with density of ρ_a . This density difference causes a reduction in gravity g in the form of $g' = g(\Delta\rho / \rho_a)$. A schematic figure of a density current is shown in Fig. 1.

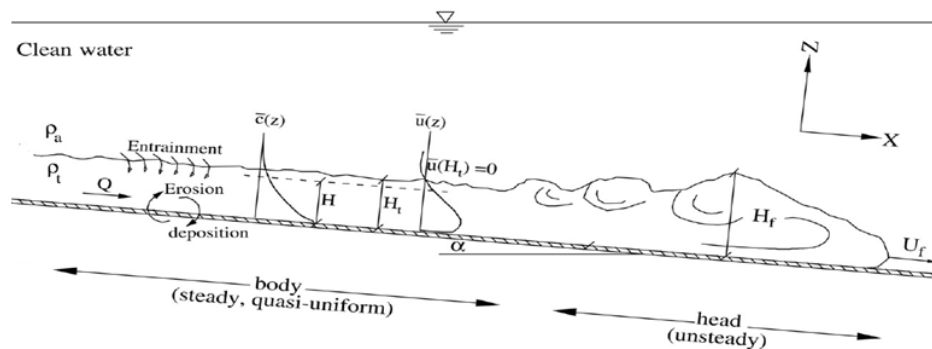


Fig. 1. Schematic representation of density current

There are many research works in the literature regarding the transport mechanism and characteristics of density currents like Xu [1], Gladstone and Pritchard [2] and Islam and Imran [3]. In this research the effect of roughness and bed slope on the velocity and concentration profiles of sedimentary density current in subcritical regime was investigated. Equations were developed as a function of relative roughness for determination of coefficients and powers of empirical equations of velocity profile in jet and wall zone. Also the percentage changes of characteristics of velocity and concentration profiles considering relative roughness comparison with no roughness condition were calculated.

2. Methodology

Experiments were conducted in a tilting flume with 780 cm length, 35 cm width, and 70 cm depth. The variables in these experiments were: four roughness height (k_s) including 0, 0.5, 1.0 and 1.5 cm, four bed slopes (0, 1.5, 2.5, 3.5%) and two sedimentary density current concentrations including 10 gr/lit ($\rho_t = 1008 \text{ kg/m}^3$) and 20 gr/lit

* Corresponding Author

E-mail addresses: mehdi.daryaei@yahoo.com (Mehdi Daryaei), kashefipour@scu.ac.ir (Seyed Mahmoud Kashefipour), m.ghomeshi@yahoo.com (Mehdi Ghomshi).

($\rho_t = 1017 \text{ kg/m}^3$). Discharge was kept constant and equal to 0.7 lit/sec; in total 32 experiments were planned and carried out. Flume and its apparatus are shown in Fig. 2.

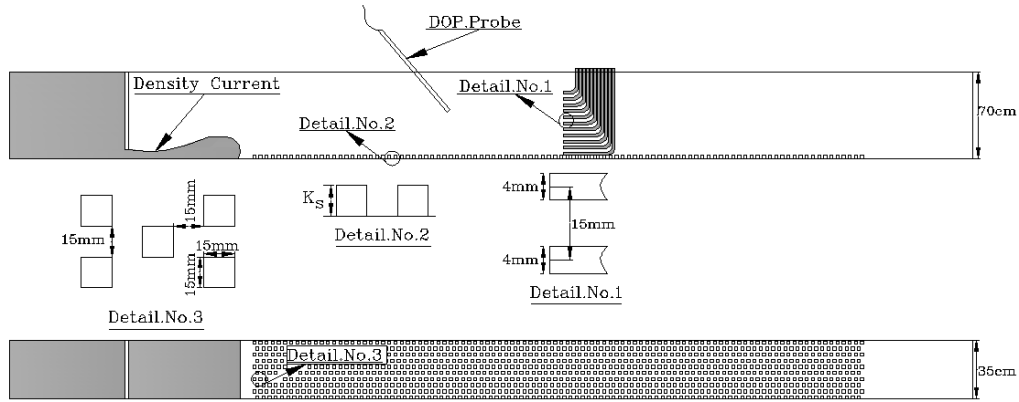


Fig. 2. Experiment setup

It should be mentioned that before starting the main experiments, one experiment was done with the bed slope of 3.5%, $\rho_t = 1017 \text{ kg/m}^3$, and without roughness to determine the minimum h_{\max} , so the maximum height of the roughness must be smaller than this h_{\max} . In this experiment h_{\max} was calculated 1.7 cm, and thus the maximum k_s was set to be 1.5 cm.

3. Results and discussion

A total of 32 time-averaged velocity profiles based on different bed slope, roughness and density were provided and shown in Figs. 3 and 4. These figures show that the velocity profile structure for the density currents is strongly influenced by the roughness height. h_{\max}/h , u_{\max}/U , and h_t/h are the main three dimensionless parameters describing the shape of the velocity profiles. These parameters for the bed without roughness ($k_s = 0$) were obtained as 0.29, 1.41 and 1.54, respectively (average of 8 experiments). The measurements for the other experiments (the rest 24 experiments) showed that increasing the bed roughness has had the maximum effect on h_{\max}/h with an average of about +96% in comparison with the experiments without bed roughness. However, the other dimensionless parameters for the same conditions have not changed too much for the bed with roughness in comparison with the bed without roughness (for u_{\max}/U about +2%, and for h_t/h about -5%). The constant values of the dimensionless velocity profile for the wall and jet regions (i.e. n , m and α_c) were specified for each considered bed roughness. The following relationships (Eqs. (1)-(3)) for these coefficients were derived using regression analysis as the functions of the relative roughness (k_s/h) as:

$$n = 0.23e^{5.27\left(\frac{k_s}{h}\right)} \quad (1)$$

$$m = 1.11e^{2.37\left(\frac{k_s}{h}\right)} \quad (2)$$

$$\alpha_c = 1.75e^{-2.74\left(\frac{k_s}{h}\right)} \quad (3)$$

4. Conclusions

Bed roughness was found to be very effective on wall region of the velocity profile, but less on jet region of the profile. The thickness of wall region was sharply increased by increasing the height of the bed roughness, whereas

the maximum and average velocities decreased. The coefficients of the well known relationships for the wall and jet regions of the dimensionless velocity profile for density current were modified and instead using the constant values, three equations were developed in which those coefficients were specified based on the relative roughness (k_s/h_{max}), and the predicted profiles by these equations were successfully verified.

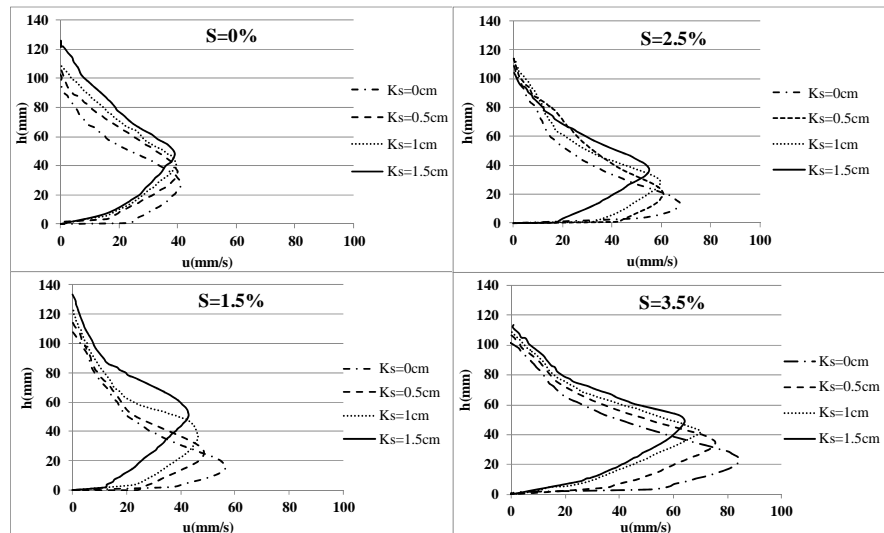


Fig. 3. Velocity profiles ($\rho_t = 1008 kg/m^3$)

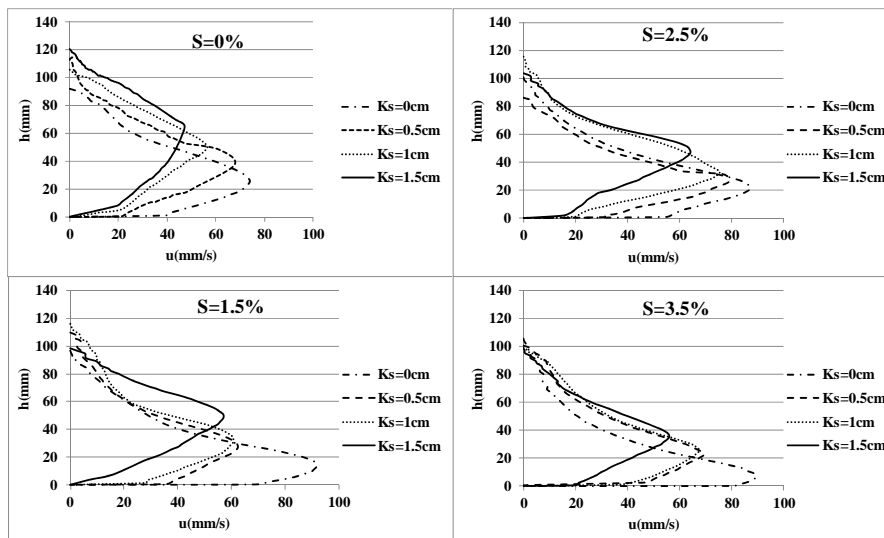


Fig. 4. Velocity profiles ($\rho_t = 1008 kg/m^3$)

5. References

- [1] Xu, J. P., Noble, M. A., Rosenfeld, L. K., "In-situ Measurements of Velocity Structure within Turbidity Currents", *Geophysical Research Letters*, 2004, 16-31.
- [2] Gladstone, C., Pritchard, D., "Patterns of Deposition from Experimental Turbidity Currents with Reversing Buoyancy", *Sedimentology*, 2010, 57 (1), 53-84.
- [3] Islam, M. A., Imran, J., "Vertical Structure of Continuous Release Saline and Turbidity Currents", *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 2010, 115 (C8), 3357-3369.