

بررسی آزمایشگاهی اثر زبری بستر روی توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ

مهدی کاهه^{۱*}، مهدی قمشی^۲ و سید حبیب موسوی جهرمی^۳

چکیده

در این پژوهش اثر زبری بستر روی توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ در دو بخش جت و دیواره بررسی شده است. بدین منظور آزمایش‌هایی به صورت جریان غلیظ نمکی با ۳ دبی ورودی ۰/۷، ۱ و ۱/۳ لیتر بر ثانیه در محدوده شیب ۰ تا ۲/۲ درصد انجام شد. برای زبر کردن بستر از ذرات شن طبیعی با اندازه‌های ۴، ۸، ۱۲ و ۱۵ میلی‌متر (که در کف کانال چسبانده شد) استفاده شد. همچنین برای بررسی اثر تغییرات غلظت جریان ورودی بر مشخصات جریان غلیظ، از سه غلظت ۱۰، ۱۶ و ۲۰ گرم بر لیتر استفاده شد. توزیع سرعت در بدنه و بررسی روند تغییرات آن در زبری و شیب‌های مختلف با یک سرعت سنج پروفایلر آلتراسونیک اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که ارتفاع سرعت حداکثر در پروفیل سرعت بدنه با افزایش زبری کف افزایش می‌یابد. نسبت ارتفاع سرعت حداکثر به ضخامت بدنه جریان غلیظ $\frac{h_m}{h}$ زمانی که زبری نسبی (نسبت ارتفاع زبری به ضخامت بدنه جریان) $\frac{k_s}{h}$ ، به سمت صفر میل می‌کند، برابر مقدار ثابت ۰/۳ خواهد بود و با افزایش زبری نسبی $\frac{k_s}{h}$ ، ارتفاع نسبی محل سرعت حداکثر $\frac{h_m}{h}$ ، به سمت عددی ثابت ۰/۶۵ همگرا می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که زبری عامل مهمی در توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ است. بررسی تشابه توزیع سرعت در ناحیه جت و دیواره، به ترتیب با توزیع‌های نیمه‌گوسی و توانی، نشان می‌دهد که ضرایب توزیع سرعت در بدنه با افزایش زبری بستر تغییر می‌کند.

واژه‌های کلیدی: توزیع سرعت، جریان غلیظ، دیواره، زبری بستر، ناحیه جت.

ارجاع: کاهه م.، قمشی م. و موسوی جهرمی س. ج. ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی اثر زبری بستر روی توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ. مجله پژوهش آب ایران. ۱۰-۱: ۲۲.

۱- فارغ‌التحصیل دکتری مهندسی آب گرایش سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

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

۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

* نویسنده مسئول: mehdi.kaheh.17@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۴/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۵/۲۸

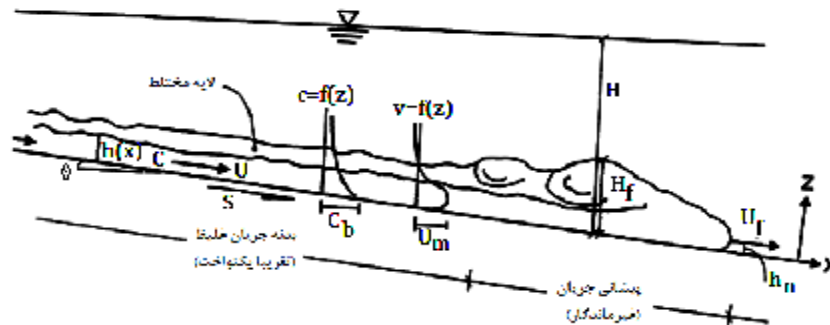
مقدمه

جریان غلیظ نوعی جریان ثقلی است، شباهتهایی با جریان در مجاری روباز دارد، با این تفاوت که در جریان غلیظ سیال پیرامون تأثیر کاهنده زیادی روی نیروی ثقل دارد، به طوری که مقدار شتاب ثقل کاهش یافته بر اساس معادله (۱) قابل محاسبه است.

$$g' = g \left(\frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_a} \right) \quad (1)$$

که در آن، g و g' به ترتیب شتاب ثقل و شتاب ثقل کاهش یافته است و ρ_t و ρ_a به ترتیب جرم مخصوص سیال غلیظ و جرم مخصوص سیال محیطی است. به طور کلی جریان غلیظ دارای دو بخش اصلی پیشانی و بدنه است (شکل ۱).

جریان‌های غلیظ در بسیاری از محیط‌های طبیعی و کاربردهای مهندسی هنگامی رخ می‌دهد که یک سیال با دانسیته بالاتر در سیال سبک‌تری جریان یابد (ایونگ و همکاران، ۲۰۰۶). ورود جریان‌های غلیظ ناشی از پساب‌ها در اقیانوس‌ها و دریاچه‌ها، فعالیت‌های بیولوژیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. جریان غلیظ یکی از مهم‌ترین پدیده‌ها در ایجاد فرآیندهای رسوبی در مخازن سدها است. از این رو شناخت پارامترهای مختلف در این نوع جریان‌ها امری ضروری است. جریان غلیظ یا جریان چگال عبارت است از جریانی که به دلیل نیروی ثقل ناشی از اختلاف چگالی بین دو سیال ایجاد می‌شود. با توجه به این که



شکل ۱- شمای کلی از پیشانی و بدنه جریان غلیظ (گراف، ۱۹۹۸)

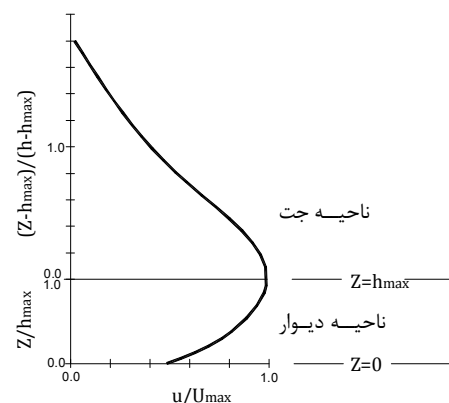
این دو ناحیه با ارتفاعی از جریان که سرعت در آن بیشینه است h_{max} قابل جدا شدن می‌باشد. در ناحیه جت آشفتگی به دلیل تنش برشی حاصل از ورود سیال محیطی به بدنه جریان به وجود می‌آید. تأثیر جریان جت و دیواره سبب شکل‌گیری توزیع سرعت و غلظت در بدنه کانال می‌شود. توزیع سرعت در ناحیه جت با استفاده از یک توزیع گوسی به صورت معادله (۲) قابل برازش است (گراف، ۱۹۹۸):

$$\frac{u(z)}{U_{max}} = \exp \left[-\alpha \left(\frac{z - h_{max}}{h - h_{max}} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

در ناحیه دیوار ($z < h_{max}$)، آشفتگی در دیواره به دلیل زبری بستر و ورود مواد رسوبی به بدنه جریان، تشکیل می‌شود. توزیع سرعت در ناحیه دیوار با استفاده از یک معادله نمایی به صورت معادله (۳) قابل برازش است (گراف، ۱۹۹۸):

$$\frac{u(z)}{U_{max}} = \left(\frac{z}{h_{max}} \right)^n \quad (3)$$

جریان غلیظ در بدنه معمولاً دائمی و به طور تقریبی یکنواخت در نظر گرفته می‌شود و نیروی محرک بدنه از نیروی ثقل مؤثر بر سیال سنگین‌تر است. بدنه جریان غلیظ به یک ترکیب جت-دیواره قابل تشبیه است و بر این اساس توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ نیز در دو ناحیه جت و دیواره قابل بررسی است (شکل ۲).



شکل ۲- پروفیل بی بعد سرعت در بدنه جریان غلیظ

جریان در ترازوی معادل ۰/۳۵ تا ۰/۵ برابر ضخامت متوسط جریان اتفاق می‌افتد. فلیکس و همکاران (۲۰۰۵) سرعت و غلظت را در یک جریان کدر اندازه‌گیری کرده و نتایج را با راه‌حل‌های تئوری مقایسه کردند. حسینی و همکاران (۲۰۰۶) با ارائه روشی به اندازه‌گیری همزمان سرعت و غلظت با استفاده از یک سرعت‌سنج آکوستیک پرداختند. گربر (۲۰۰۸) با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصاویر ذرات^۱ به بررسی تغییرات سرعت و آشفتگی در یک جریان غلیظ نمکی پرداختند و نتایج را با مدل‌سازی عددی برمبنای مدل‌های تلاطمی $k-\varepsilon$ و $RNG\ k-\varepsilon$ مقایسه کردند. فیروزآبادی و همکاران (۲۰۰۹) در یک بررسی آزمایشگاهی از جریان غلیظ سه‌بعدی، با استفاده از سرعت‌سنج آکوستیک داپلر^۲ سرعت لحظه‌ای و مشخصات تلاطمی را در بدنه جریان بررسی کردند. کاشفی‌پور و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی و تجزیه و تحلیل پروفیل‌های سرعت در جریان غلیظ تحت شرایط متغیری از شیب کف، دبی و غلظت جریان و کشش سیال پیرامون پرداختند و نشان دادند که اعمال هر یک از شرایط بالا تأثیر به‌سزایی بر مشخصه‌های پروفیل‌های سرعت دارد. بیشتر پژوهش‌های انجام شده در خصوص هیدرولیک جریان‌های غلیظ، در بسترهای صاف انجام شده و رفتار هیدرولیکی این نوع جریان‌ها در مقاطع با بستر زیر کمتر بررسی شده است. پترز (۱۹۹۹) با استفاده از روش لیزر القاء شده با فلئورسانس^۳ و با ایجاد زبری‌های دو بعدی در یک فلوم آزمایشگاهی با شیب افقی، سرعت پیشروی جریان غلیظ نمکی را روی سطوح زبر بررسی کرد. روکا و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی جریان غلیظ سه بعدی روی سطوح زبر، نشان دادند که مقدار کاهش سرعت پیشروی جریان در زبری‌های مختلف یکنواخت است. اسکوپروس و همکاران (۲۰۱۰) براساس یک سری آزمایش‌های جریان غلیظ نمکی و رسوبی روی بستر متحرک بیان کردند که شکل‌گیری فرم بستر در رژیم‌های مختلف با یکدیگر متفاوت بوده و اثر متفاوتی نیز روی پروفیل سرعت در نزدیک بستر دارد. برهمند و شمسایی (۲۰۱۰) با استفاده از تئوری پرش هیدرولیکی در مجاری رو باز و اصلاح آن

بر اساس نتایج آلتیناکار و همکاران (۱۹۹۶) مقدار هر یک از ضریب‌های α ، β و n در معادلات توزیع سرعت در ناحیه جت و دیواره در یک بستر به طور کامل صاف به ترتیب برابر ۱/۴ و ۲ و ۰/۱۶ است. همچنین آنان مقدار نسبت $\frac{h_{max}}{h}$ را برابر ۱/۳ پیشنهاد کردند. در زمینه ساختار حرکت و تغییرات سرعت در بدنه جریان غلیظ پژوهش‌های بسیاری انجام شده است. گارسیا (۱۹۹۳) یک مدل انتگرالی برای جریان رسوبی ماندگار با رسوب غیریکنواخت ارائه کرد و آن را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد. نتایج حاصل از پژوهش آنان نشان می‌دهد که پروفیل‌های سرعت به ویژه در جریان فوق‌بحرانی به تئوری بیان شده بسیار نزدیک است. یو و همکاران (۲۰۰۰) در یک بررسی آزمایشگاهی پروفیل‌های سرعت و غلظت در جریان‌های شبه‌همگن، رسوب‌گذار و بدون رسوب‌گذاری را بررسی کردند. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که نیروی ثقل مؤثر، نیروی محرک اصلی برای سرعت در یک جریان غلیظ لایه‌ای است و توزیع سرعت بسیار وابسته به پروفیل‌های غلظت است. براساس نظرات بوکی و همکاران (۲۰۰۱) در جریان‌های غلیظ رسوبی، لایه‌بندی در زیر تراز سرعت بیشینه به طور عموم پایدار است. مک‌کافری و همکاران (۲۰۰۳) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی جریان غلیظ رسوبی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ارتفاع بیشینه سرعت هم در بدنه و هم در پیشانی جریان به طور تقریبی در یک سوم ارتفاع از کف قرار داشته و این ارتفاع با گذشت زمان تغییر نمی‌کند. چوکس و همکاران (۲۰۰۵) آزمایش‌هایی مشابه با بررسی‌های مک‌کافری و همکاران (۲۰۰۳)، ولی با غلظت ورودی متفاوت انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که ارتفاع بیشینه سرعت مستقل از غلظت ورودی بوده و محل آن مشابه نتایج قبلی در یک سوم ارتفاع از کف اتفاق می‌افتد. باس و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که توزیع ذرات معلق بسیار ناپایدار است و با نسبت سرعت سقوط ذره به مؤلفه‌های رو به بالا از سرعت تلاطم محلی کنترل می‌شود. کشتکار و همکاران (۱۳۸۹) در یک بررسی آزمایشگاهی در جریان غلیظ رسوبی نشان دادند که نسبت ضخامت واقعی جریان به ضخامت متوسط جریان برابر با ۱/۴ بوده و ارتفاع نیز مانند غلظت متوسط

1- Particle Image Velocimetry

2- Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)

3- Laser-Induced Fluorescence (LIF)

طولی معادل ۹ متر) با شیب قابل تغییر در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد. آزمایش‌ها به صورت جریان غلیظ نمکی در ۳ دبی ورودی ۰/۷، ۱ و ۱/۳ لیتر بر ثانیه و در محدوده شیب ۰ تا ۲/۲ درصد انجام شد. برای زبر کردن بستر از ذرات شن طبیعی با اندازه‌های ۰/۴، ۰/۸، ۱/۲ و ۱/۵ میلی‌متر (که روی بستر چسبانده شدند)، استفاده شد. همچنین برای بررسی اثر تغییرات غلظت جریان ورودی بر مشخصات جریان غلیظ، از سه غلظت ۱۰، ۱۶ و ۲۰ گرم بر لیتر استفاده شد. جدول ۱ خلاصه‌ای از مشخصات آزمایش‌های انجام شده و شکل ۳ طرح شماتیک مدل فیزیکی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

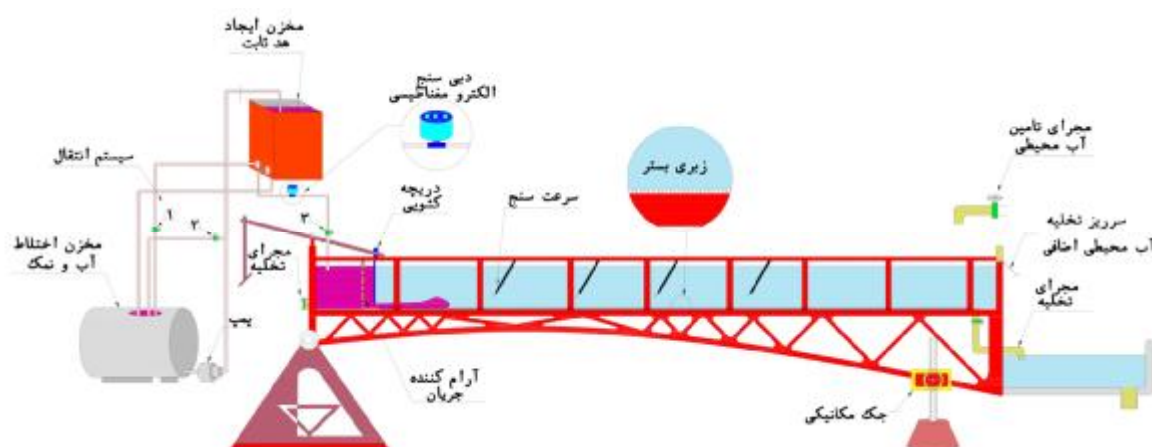
برای جریان‌های غلیظ، رابطه‌ای برای نسبت عمق مزدوج در پرش جریان‌های غلیظ روی سطوح زبر ارائه کردند. کاهه و همکاران (۱۳۹۱) در یک بررسی آزمایشگاهی از جریان غلیظ بر اساس آنالیز ابعادی رابطه‌ای را برای تخمین سرعت پیشروی روی سطوح زبر ارائه کردند. با توجه به این که خصوصیات هیدرولیکی جریان غلیظ تحت تاثیر زبری و شیب بستر قرار دارد، در این پژوهش توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ روی سطوح زبر در دو بخش جت و دیواره بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

برای بررسی اثر زبری بر روی توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ از یک فلوم آزمایشگاهی (با عرض ۳۵ سانتی‌متر و

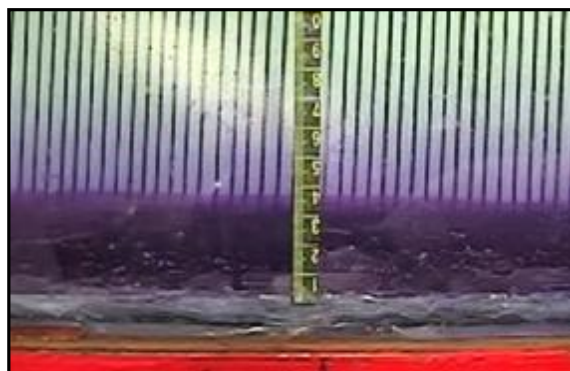
جدول ۱- خلاصه‌ای از مشخصات آزمایشات انجام شده در این پژوهش

زبری (mm)	شیب %	دبی جریان غلیظ (lit/s)	غلظت (gr/lit)
۰، ۰/۴، ۰/۸، ۱/۲، ۱/۵	۰/۵، ۱/۱، ۱/۵، ۲/۲	۱/۳ و ۰/۷	۱۰، ۱۵ و ۲۰



شکل ۳- طرح شماتیک مدل فیزیکی مورد استفاده

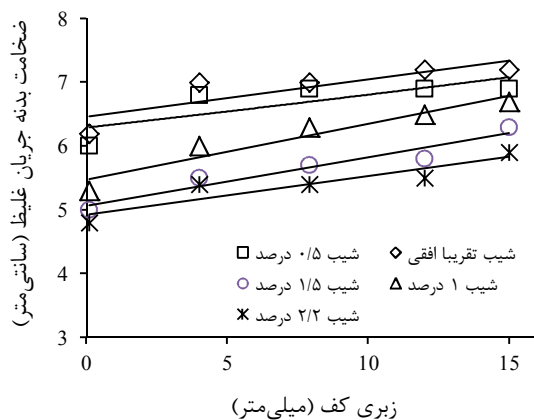
مدت ۲۰ ثانیه (در مجموع ۱۵۰ پروفیل)، اندازه‌گیری شدند.



شکل ۴- جریان غلیظ و ضخامت بدنه جریان

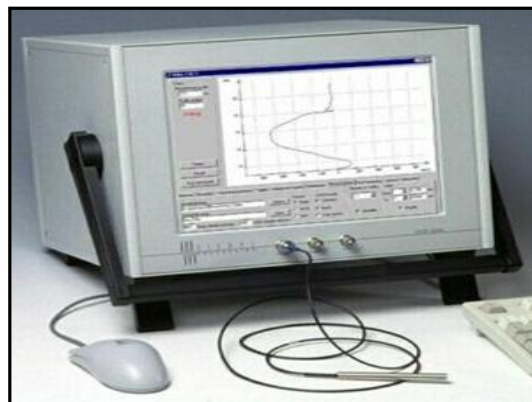
پس از رسیدن رأس جریان به انتهای فلوم و شکل‌گیری بدنه یکنواخت جریان غلیظ در بخش میانی از طول کانال، ضخامت بدنه و پروفیل‌های سرعت اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری ضخامت بدنه با استفاده از اشل‌های نصب شده روی فلوم آزمایشگاهی انجام شد (شکل ۴). در این پژوهش برای اندازه‌گیری پروفیل سرعت از دستگاه سرعت‌سنج آلتراسونیک^۱ استفاده شد. این سیستم توانایی ثبت مقادیر سرعت در جهت جریان به صورت پروفیل عمقی را دارد (شکل ۵). قابل ذکر است که، پروفیل‌های عمقی سرعت در راستای جریان با فرکانس ۷/۵ هرتز در

۱- سرعت سنج پروفایلو آلتراسونیک UDVP مدل DOP2000



شکل ۸- تغییرات ضخامت بدنه در مقابل تغییرات زبری (دبی ۱ lit/s، اختلاف دانسیته ۰/۱۵ gr/cm³)

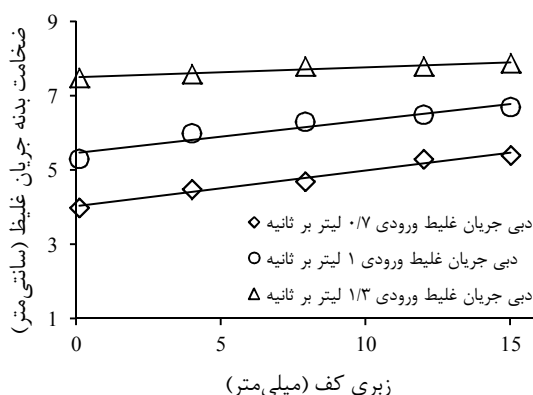
برای بررسی توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ، متوسط مقادیر ثبت شده پروفیل‌های سرعت در زمان به‌عنوان توزیع سرعت در نظر گرفته شد. شکل ۹ پروفیل‌های سرعت در شیب و زبری‌های مختلف را در دبی ۱/۳ لیتر بر ثانیه و اختلاف دانسیته ۰/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب نشان می‌دهند. با افزایش زبری کف، تنش برشی بستر افزایش یافته در نتیجه ضخامت ناحیه دیوار (که تحت تأثیر تنش برشی بستر قرار دارد) نیز افزایش می‌یابد و بر این اساس (با توجه به شکل ۹) ارتفاع محل حداکثر سرعت در پروفیل سرعت بدنه h_{max} (محل جداسازی پروفیل جت و دیواره) نیز افزایش می‌یابد. برای بررسی بیشتر، ارتفاع محل حداکثر در پروفیل‌های سرعت بدنه جریان غلیظ در مقابل زبری کف در حالت‌های مختلف از دبی ورودی و جرم مخصوص سیال غلیظ در شکل ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بسترهای زیر توزیع سرعت در ناحیه دیوار بیشتر تحت تأثیر زبری قرار دارد، به‌طوری که با افزایش زبری، ارتفاع محل سرعت حداکثر نیز افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که ارتفاع محل سرعت حداکثر با افزایش شیب کانال در بیشتر موارد کاهش می‌یابد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر، دو پارامتر ارتفاع نسبی محل سرعت بیشینه (نسبت ارتفاع محل سرعت بیشینه به ضخامت بدنه جریان غلیظ) $\frac{h_{max}}{h}$ و زبری نسبی (نسبت ارتفاع زبری به ضخامت بدنه جریان) $\frac{k_s}{h}$ در حالت‌های مختلف از دبی ورودی و جرم مخصوص سیال غلیظ در مقابل یکدیگر ترسیم شد (شکل ۱۱).



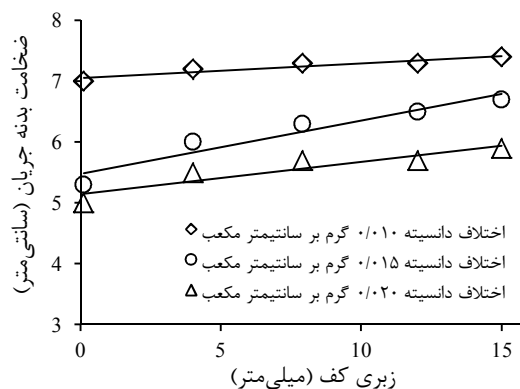
شکل ۵- شمای کلی از دستگاه سرعت‌سنج آلتراسونیک

نتایج و بحث

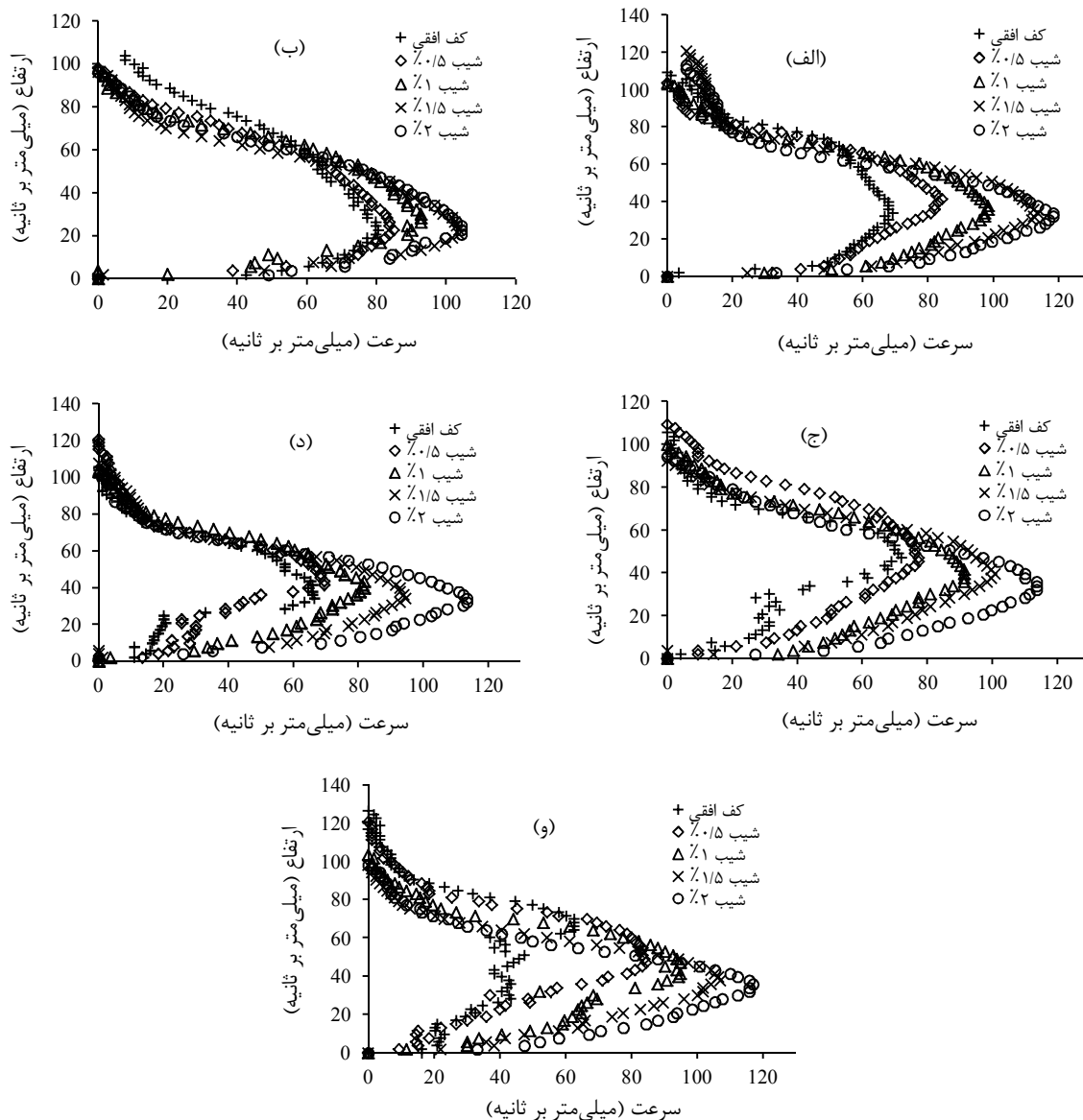
یکی از مشخصه‌های مهم جریان غلیظ که تحت تأثیر زبری کف قرار دارد، ضخامت بدنه جریان غلیظ است. شکل‌های ۶ تا ۸ نمودار تغییرات ضخامت بدنه جریان غلیظ در مقابل زبری در شرایط مختلف دبی، اختلاف دانسیته و شیب کانال را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زبری مقاومت در حرکت جریان افزایش یافته و سبب افزایش ضخامت بدنه جریان می‌شود.



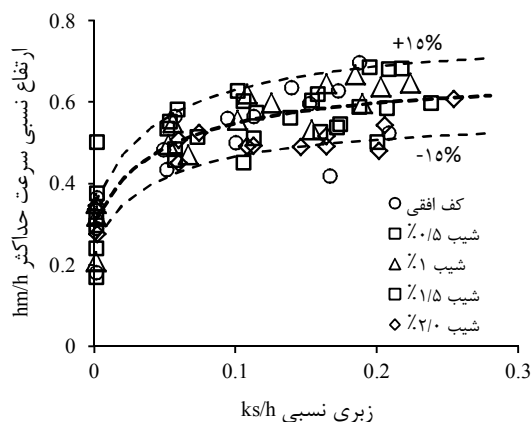
شکل ۶- تغییرات ضخامت بدنه در مقابل تغییرات زبری (اختلاف دانسیته ۰/۱۵ gr/cm³، شیب ۱٪)



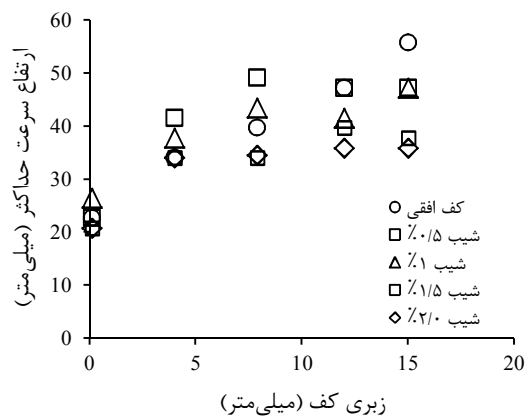
شکل ۷- تغییرات ضخامت بدنه در مقابل تغییرات زبری (دبی ۱ lit/s، شیب ۱٪)



شکل ۹- پروفیل‌های سرعت در زبری‌های مختلف در دبی $1/3 \text{ lit/s}$ و اختلاف دانسیته 0.15 gr/cm^3 (الف) سطح صاف، ب) زبری ۴ mm، ج) زبری ۸ mm، د) زبری ۱۲ mm و و) زبری ۱۵ mm

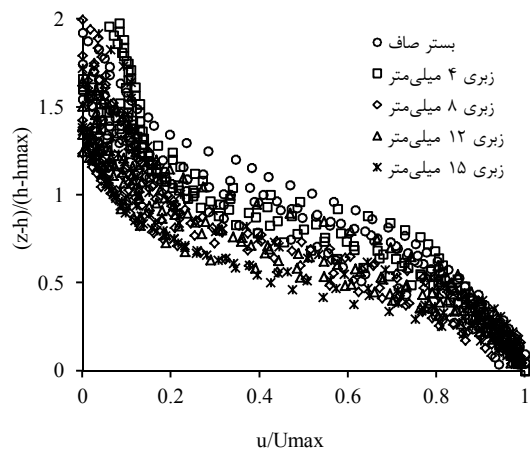


شکل ۱۱- تغییرات ارتفاع نسبی محل حداکثر سرعت در مقابل زبری‌های مختلف



شکل ۱۰- تغییرات ارتفاع محل سرعت حداکثر h_{max} در مقابل زبری کف در شیب‌های مختلف

زبری کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲- نمونه‌ای از پروفیل‌های بی‌بعد سرعت در ناحیه جت

به منظور بررسی دقیق‌تر، کلیه پروفیل‌های سرعت بی‌بعد در ناحیه جت (در زبری‌های مختلف) با استفاده از توزیع نیمه‌گوسی (معادله (۲)) به روش حداقل کردن میانگین مربعات خطا برازش شد. نتایج حاصل از این بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش زبری ضرائب معادله نیمه‌گوسی (α و β) با ضریب تبیین $R^2=0.90$ ، به ترتیب در محدوده $1/2$ تا $2/17$ و $2/21$ تا $1/83$ تغییر می‌کند. نتایج به دست آمده از ضرائب α و β در این پژوهش (در بستر صاف) با نتایج به دست آمده توسط آلتیناکار و همکاران (۱۹۹۶) ($\alpha=1/4$ و $\beta=2$) تشابه بسیار زیادی دارد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ارتفاع نسبی محل سرعت حداکثر $\frac{h_{max}}{h}$: زمانی که زبری نسبی $\frac{k_s}{h}$ ، به سمت صفر میل کند، برابر مقدار ثابت 0.3 است که با نتایج به دست آمده توسط آلتیناکار و همکاران (۱۹۹۶) هماهنگی دارد. از طرف دیگر با افزایش زبری نسبی $\frac{k_s}{h}$ ، ارتفاع نسبی محل سرعت حداکثر $\frac{h_{max}}{h}$ ، به سمت مقدار ثابت 0.67 همگرا می‌شود. بهترین رابطه بر اساس آنالیز انجام شده میان $\frac{h_{max}}{h}$ در مقابل $\frac{k_s}{h}$ از نوع گویا بوده و به روش حداقل کردن میانگین مربعات خطا به صورت معادله (۴) قابل تعریف است:

$$\frac{h_m}{h} = \frac{0.673 \frac{k_s}{h} + 0.0158}{\frac{k_s}{h} + 0.0516} \quad (4)$$

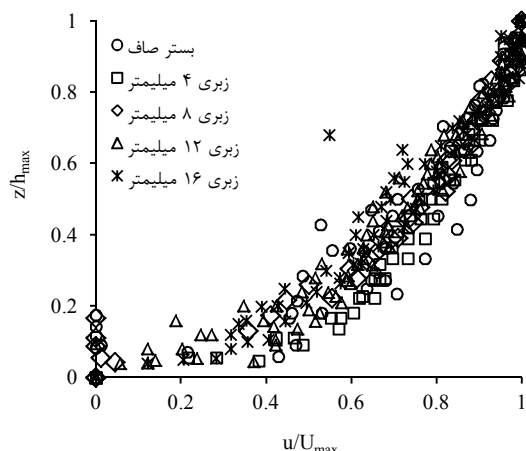
رابطه بالا با متوسط خطای نسبی 1.2% و ضریب همبستگی $R=0.86$ ، بهترین رابطه برای تخمین ارتفاع محل سرعت حداکثر در پروفیل سرعت بدنه جریان غلیظ ارائه می‌دهد. به منظور بررسی اثر زبری بستر روی توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ، هر یک از نواحی جریان جت و دیواره توزیع بی‌بعد سرعت در شرایط مختلف از جریان ورودی با معادله‌های (۲) و (۳) برازش داده شد. شکل ۱۲ نمونه‌ای از پروفیل‌های سرعت بی‌بعد محاسبه شده در ناحیه جت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضخامت لایه توزیع سرعت بی‌بعد در ناحیه جت با افزایش

جدول ۲- ضرائب توزیع نیمه‌گوسی برای پروفیل‌های بی‌بعد در ناحیه جت

نام پروفیل	بستر صاف	زبری ۴ mm	زبری ۸ mm	زبری ۱۲ mm	زبری ۱۵ mm
ضرائب معادله گوسی	α	۱/۳۵	۱/۸۱	۱/۶۳	۲/۱۷
ضریب تبیین R^2	۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۳

تغییرات پروفیل‌های بی‌بعد سرعت در ناحیه دیوار (در شرایط شیب و جریان ورودی یکسان) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پروفیل سرعت در این ناحیه به شدت تحت تأثیر زبری و افزایش تنش برشی ناشی از افزایش زبری بستر قرار دارد. به طوری که پروفیل بی‌بعد سرعت در ناحیه دیوار با افزایش زبری از حالت یک منحنی مقعر به سمت خط با شیب ثابت تغییر می‌کند.

بخش دیگری از پروفیل سرعت در بدنه جریان غلیظ ناحیه دیوار است. پروفیل سرعت در این ناحیه تحت تأثیر زبری و حمل مواد از بستر به بدنه جریان غلیظ (در بسترهای متحرک) است. برای بررسی اثر زبری بر توزیع سرعت در ناحیه دیوار، پروفیل‌های سرعت در این ناحیه با استفاده از دو پارامتر U_{max} و h_{max} و بر اساس توزیع توانی (معادله (۳)) بی‌بعد شد. شکل ۱۳ نمونه‌ای از



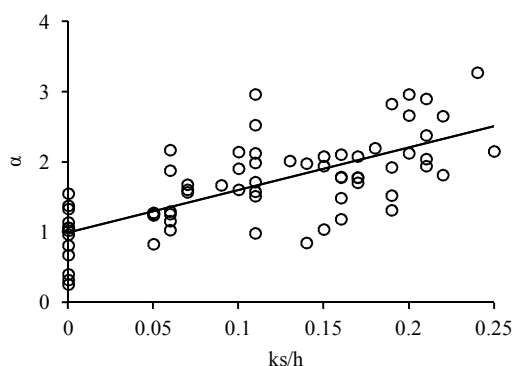
شکل ۱۳- نمونه‌ای از توزیع سرعت بی‌بعد در ناحیه دیوار

به‌منظور بررسی دقیق‌تر کلیه پروفیل‌های بی‌بعد شده در ناحیه دیوار در زبری‌های مختلف با استفاده از توزیع توانی برازش شد. جدول ۳ نتایج حاصل از تشابه پروفیل سرعت در ناحیه دیوار با رابطه توانی را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود توزیع سرعت در ناحیه دیوار بسیار تحت تاثیر زبری بوده و مقدار توان توزیع غیرخطی برازش شده برای کلیه آزمایش‌ها (صرف‌نظر از تغییرات شیب، مقدار و غلظت جریان ورودی) از ۰/۲۵ در سطح صاف تا ۰/۵۵ در سطوح با زبری ۱۵ میلی‌متر تغییر می‌کند.

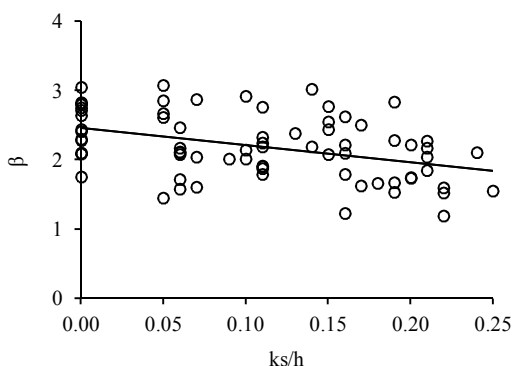
جدول ۳- ضریب توزیع توانی برای پروفیل سرعت بی‌بعد در ناحیه دیوار

نام پروفیل	بستر صاف	زبری ۴ mm	زبری ۸ mm	زبری ۱۲ mm	زبری ۱۵ mm
توان معادله n	۰/۲۲	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۴۵	۰/۵۵
ضریب تبیین R ^۲	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۸۸



شکل ۱۴- تغییرات ضریب α توزیع سرعت بی‌بعد در ناحیه

دیوار در مقابل زبری نسبی $\frac{k_s}{h}$



شکل ۱۵- تغییرات ضریب β توزیع سرعت بی‌بعد در ناحیه

دیوار در مقابل زبری نسبی $\frac{k_s}{h}$

در این پژوهش، براساس کلیه پروفیل‌های اندازه‌گیری شده سرعت در ناحیه جت و دیواره در زبری، شیب و شرایط مختلف از جریان ورودی، روند تغییر ضریب‌های توزیع سرعت در مقابل پارامتر زبری نسبی $\frac{k_s}{h}$ محاسبه شد. روند تغییرات هر یک از ضرایب α ، β و n (در معادلات (۲) و (۳)) در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ ارائه شده است. بر این اساس زبری نسبی با افزایش تنش برشی بستر و ضخامت لایه مرزی به‌عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در تغییر توزیع سرعت بوده و اثر آن به‌صورت معادله‌های (۵)، (۶) و (۷) قابل بیان است. همانطور که مشاهده می‌شود با ضریب همبستگی بیش از ۰/۶ دامنه تغییرات ضرایب α و n از معادلات توزیع سرعت به ترتیب در ناحیه جت و دیوار دارای ضرایب همبستگی بالاتر از ۰/۶ هستند.

$$\alpha = 6.064 \frac{k_s}{h} + 1.05, R = 0.71 \quad (5)$$

$$\beta = -2.504 \frac{k_s}{h} + 2.467, R = 0.42 \quad (6)$$

$$n = 1142 \frac{k_s}{h} + 0.337, R = 0.61 \quad (7)$$

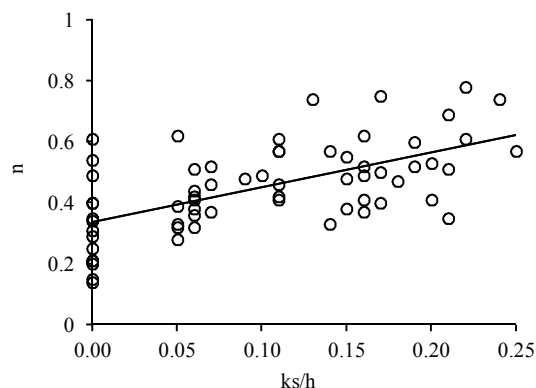
ناحیه جت (α و β) با ضریب رگرسیون بیش از $R^2=0.90$ به ترتیب در محدوده $1/2$ تا 2 و $1/8$ تا $2/2$ تغییر می‌کند. همچنین در بررسی تشابه توزیع سرعت بدنه جریان غلیظ در ناحیه دیوار با رابطه غیرخطی نتایج نشان می‌دهد که، توزیع سرعت در ناحیه دیوار بسیار تحت تأثیر زبری بوده و مقدار توان معادله غیرخطی برازش شده برای کلیه آزمایش‌های از 0.2 در سطح صاف تا 0.6 در سطوح زبر با زبری 15 میلی‌متر تغییر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر زبری نسبی عوامل مختلف دیگر از جمله شیب و شرایط جریان ورودی نیز تأثیرگذار بر روند تغییر توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ بوده و سبب کاهش و یا افزایش اثر زبری روی توزیع سرعت بدنه جریان خواهد شد.

سپاس‌گزاری

در پایان از کلیه استادان محترم و مسئولان دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل همکاری فراوان در فراهم آوردن امکانات مورد نیاز در این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- کاهه م، قمشی م، و موسوی جهرمی س. ح. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی سرعت پیشروی جریان غلیظ بر روی سطوح زبر. علوم و مهندسی آبیاری. ۳۵(۱): ۱۰۱-۱۱۰.
- کشتکار ش. ایوب‌زاده س. ع. و فیروزآبادی ب. ۱۳۸۹. بررسی پروفیل سرعت و غلظت جریان گل‌آلود با استفاده از مدل فیزیکی. پژوهش‌های آبخیزداری. ۲۳(۲): ۳۳-۴۰.
- Altinakar M. S. Graf W. H. and Hopfinger E. J. 1996. Flow structure in turbidity currents. Journal of Hydraulic Research. 34(5): 713-718.
- Baas J. H. McCaffrey W. D. Houghton P. D. W. and Choux C. 2005. Coupling between Suspended sediment distribution and turbulence structure in laboratory turbidity current. Journal of Geophysics Research. 110: 20-32.
- Barahmand N. and Shamsai A. 2010. Experimental and theoretical study of density jumps on smooth and rough beds. Lakes and Reservoirs: Research and Management. 15(4): 285-307.



شکل ۱۶- نمودار تغییرات ضریب توزیع سرعت بی‌بعد در ناحیه دیوار n در مقابل زبری نسبی $\frac{k_s}{h}$

همچنین با توجه به پراکندگی موجود در نمودار تغییرات هر یک از ضرایب معادله توزیع سرعت می‌توان بیان کرد که، علاوه بر زبری نسبی عوامل دیگری از جمله شیب و شرایط جریان ورودی نیز تأثیرگذار بوده و سبب کاهش و یا افزایش اثر زبری روی توزیع سرعت خواهد شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش پس از انجام آزمایش‌های مختلف از جریان غلیظ روی سطوحی با زبری‌های متفاوت و اندازه‌گیری و بررسی توزیع سرعت در بدنه جریان غلیظ نتایجی به شرح زیر حاصل شد:

ارتفاع سرعت حداکثر در پروفیل سرعت در بدنه جریان غلیظ با افزایش زبری کف افزایش یافته به طوری که بهترین رابطه براساس آنالیزهای انجام شده میان پارامتر بی‌بعد ارتفاع سرعت حداکثر در پروفیل سرعت $\frac{h_{max}}{h}$ در

مقابل زبری نسبی $\frac{k_s}{h}$ از نوع گویا است. نسبت ارتفاع سرعت حداکثر به ضخامت بدنه جریان غلیظ $\frac{h_m}{h}$ زمانی که زبری نسبی (نسبت ارتفاع زبری به ضخامت بدنه جریان) $\frac{k_s}{h}$ ، به سمت صفر میل می‌کند، برابر مقدار ثابت

0.3 خواهد بود و با افزایش زبری نسبی $\frac{k_s}{h}$ ، ارتفاع نسبی محل سرعت حداکثر $\frac{h_m}{h}$ ، به سمت عددی ثابت 0.65

همگرا می‌شود. در بررسی تشابه توزیع سرعت بدنه جریان غلیظ در ناحیه جت با توزیع گوسی نتایج نشان می‌دهد که، با افزایش زبری کف ضریب‌های معادله گوسی در

- currents. *Marine and Petroleum Geology*. 20: 851-860.
18. Peters W. D. 1999. Rough Surface Gravity Current Flows. Ph.D. Thesis. University of New Brunswick. Canada.
 19. Sequeiros O. E. Spinewine B. Beaubouef R. T. Sun T. Garcia H. M. and Parker G. 2010. Characteristics of Velocity and Excess Density Profiles of Saline Underflows and Turbidity Currents Flowing over a Mobile Bed. *Journal of Hydraulic Engineering*. 136(7): abstract.
 20. Yu W. S. Lee H. Y. and Hsu M. S. 2000. Experiments on deposition behavior of fine in a reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*. 126(12): 912-920.
 6. Buckee C. Kneller B. and Peakall J. 2001. Turbulence structure in steady solute-driven gravity currents Blackwell Oxford. pp. 173-188.
 7. Choux C. M. A. Baas J. H. McCaffrey W. D. and Haughton P. D. W. 2005. Comparison of spatio-temporal evolution of experimental particulate gravity flows at two different initial concentrations based on velocity grain size and density data. *Sedimentary Geology*. 179: 49-69.
 8. Felix M. Sturton S. and Peakall J. 2005. Combined measurements of velocity and concentration in experimental turbidity currents *Sedimentary Geology* 179: 31-47.
 9. Firoozabadi B. Afshin H. and Bagherpour A. 2010. Experimental Investigation of Turbulence Specifications of Turbidity Currents. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 3(1): 63-73.
 10. Garsia M. H. 1993. Depositional Turbidity Currents Laden With Poorly Sorted Sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*. 120(11): abstract.
 11. Gerber G. 2008. Experimental measurement and numerical modeling of velocity density and turbulence profiles of gravity current. Dissertation presented for the degree of Doctor of Philosophy (Engineering) University of Stellenbosch.
 12. Graf W. H. and Altinakar M. S. 1998. Fluvial hydraulics: flow and transport in channel of simple geometry. John Wiley and Sons England. 661 p.
 13. Hosseini S. A. A. Shamsai and Ataie-Ashtiani B. 2006. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter. *J. Flow Measurement and Instrument*. 17: 59-68.
 14. Jeong K. K. Mok K. M. and Yeh H. 2006. Fluctuation of the front propagation speed of developed gravity current. *Journal of Hydrodynamics*. 18(3): 351-355.
 15. Kashefipour S. M. F. Kooti and Ghomeshi M. 2010. Effect of reservoir bed slope and density current discharge on water entrainment. 6th International Symposium on Environmental Hydraulics Greece.
 16. La Rocca M. Adduce C. Sciortino G. and Pinzon A. B. 2008. Experimental and numerical simulation of three-dimensional gravity currents on smooth and rough bottom. *Physics of Fluids*. 20.
 17. McCaffrey W. D. Choux C. M. Baas J. H. and Haughton P. D. W. 2003. Spatio-temporal evolution of velocity structure concentration and grain size stratification within experimental particulate gravity