

بررسی آزمایشگاهی تاثیر ارتفاع زبری بر روی اختلاط آب و کنترل دبی جریان غلیظ

مهدی دریایی*^۱، سید محمود کاشفی پور^۲، مهدی قمشی^۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۲۹

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

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

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Mehdi.daryae@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق تأثیر زبری برای شیب‌های کف متغیر بر روی کنترل جریان غلیظ رسوبی در حالت زیربحرانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که افزایش ارتفاع زبری در هر شیب تأثیر قابل توجهی در کاهش دبی پیشانی جریان غلیظ رسوبی (از ۴۰ تا ۷۰ درصد در غلظت ۱۰ گرم در لیتر و از ۳۵ تا ۵۵ درصد در غلظت ۲۰ گرم در لیتر) دارد. همچنین مقادیر ضریب شدت اختلاط نیز با افزایش ارتفاع زبری در هر شیب کاهش یافت (از ۵۰ تا ۶۰ درصد در غلظت ۱۰ گرم در لیتر و از ۴۸ تا ۶۰ درصد در غلظت ۲۰ گرم در لیتر). در انتها رابطه‌ای به‌منظور پیش‌بینی میزان ضریب شدت اختلاط به‌صورت تابعی از عدد ریچاردسون و با در نظر گرفتن تأثیر زبری نسبی ارائه گردید. تحلیل حساسیت بر روی رابطه ارائه شده در این تحقیق نشان داد که تأثیر عدد ریچاردسون در پیش‌بینی ضریب شدت اختلاط به‌مراتب بیشتر از تأثیر زبری نسبی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: زبری نسبی، شیب بستر، ضریب اختلاط، عدد ریچاردسون، کنترل جریان غلیظ

Experimental Study on the Effect of Roughness Height on the Water Entrainment and Control of Density Current Discharge

M Daryae^{*1}, SM Kassefipour², M Ghomshi²

Received: 3 March 2014

Accepted: 31 August 2014

¹Ph.D Student, Hydraulic Structures Dept, Faculty of Water Sci., Engin., Shahid Chamran Univ. of Ahwaz, Iran

²Prof., Hydraulic Structures Dept, Faculty of Water Sciences Engin., Shahid Chamran Univ. of Ahwaz, Iran

* Corresponding Author, Email: Mehdi.Daryae@yahoo.com

Abstract

In this research the effect of roughness for different bed slopes on the control of sedimentary density current in subcritical conditions was investigated. The results showed that for each bed slope increasing the roughness height had considerable effect on reducing the load discharge of density current front (from 40% to 70% for concentration of 10 g L⁻¹ and 35% to 55% for concentration of 20 g L⁻¹). Also the amount of water entrainment rate reduced with increasing the roughness height (from 50% to 60% for concentration of 10 g L⁻¹ and 48% to 60% for concentration of 20 g L⁻¹). Finally, an equation for predicting water entrainment as a function of Richardson Number and relative roughness was presented. Sensitivity analysis of the proposed equation in this research showed that the effect of Richardson number on estimation of the water entrainment is much more than the effect of relative roughness on it.

Keywords: Bed slope, Entrainment coefficient, Gravity current controlling, Relative roughness, Richardson Number

مقدمه

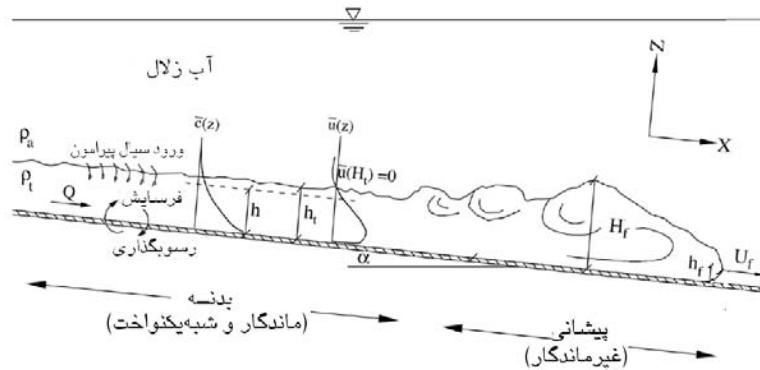
به منظور کنترل آن امری اجتناب ناپذیر می باشد. جریان غلیظ جریانی با چگالی بالا (ρ_t) است که ذاتاً به دلیل اثر اختلاف چگالی دو سیال بر روی شتاب جاذبه به وجود می آید. شتاب ثقل مؤثر بر جریان که به عنوان نیروی محرک در جریان غلیظ مطرح می باشد به صورت زیر بیان می گردد (اوهی و اشلاز ۲۰۰۴):

$$g' = g \frac{(\rho_t - \rho_a)}{\rho_a} \quad [1]$$

رسوبگذاری در مخازن سدها علاوه بر از بین بردن عمر مفید آنها باعث ایجاد خسارات جبران ناپذیری به سازه های جانبی سدها مانند آبگیرها، دریچه های تخلیه تحتانی و تأسیسات تولید انرژی خواهد شد. جریان غلیظ ضمن حرکت باعث ایجاد فرسایش در بستر شده و پس از رسیدن به نزدیکی بدنه سد باعث رسوبگذاری در این ناحیه می شود. با توجه به اهمیت پدیده جریان غلیظ در حرکت رسوبات در مخازن سدها، شناخت این پدیده و ارائه راهکارهایی

در شکل ۱ شماتیکی از حرکت جریان غلیظ و پارامترهای مؤثر در فرسایش و رسوبگذاری آن ارائه شده است.

که در این رابطه، g' : شتاب ثقل کاهش یافته، ρ_a دانسیته سیال پیرامون و ρ_f دانسیته سیال غلیظ می-باشد.



شکل ۱- شماتیکی از جریان غلیظ (حسینی و همکاران ۲۰۰۶).

جریان و ضخامت رسوبگذاری تا فاصله قابل ملاحظه- ای از مانع تأثیر بگذارد. سکیوریس و همکاران (۲۰۰۹) مطالعاتی بر روی شتاب گرفتن جریان غلیظ ناشی از ورود ذرات معلق از بستر به درون جریان غلیظ انجام داده و نشان دادند که خصوصیات مواد بستر در شکل-گیری این پدیده نقش بسیار مهمی ایفا می-کند. سکیوریس و همکاران (۲۰۱۰) در خصوص حرکت جریان غلیظ بر روی بستر متحرک مطالعاتی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با توجه به نوع رژیم جریان (زیر بحرانی یا فوق بحرانی) با گذشت زمان ممکن است بستر بدون تغییر مانده یا فرم بستر تشکیل شود که بر روی پروفیل عمودی سرعت تأثیرگذار خواهد بود. گارشیا (۱۹۹۲) بیان کرد که جریان غلیظ می-تواند با اختلاف چگالی بسیار کم با سیال پیرامون تشکیل شده و مسافت زیادی را طی کنند. کاهه (۱۳۹۱) بر روی تأثیر زبری طبیعی بر روی خصوصیات جریان غلیظ نمکی مطالعاتی انجام داد و به این نتیجه رسید که روابط ارائه شده برای حرکت جریان غلیظ روی بستر صاف را نمی-توان برای حرکت جریان غلیظ روی بستر

لافکوئیست (۱۹۶۰) آزمایشاتی را به منظور تعیین ضریب شدت اختلاط انجام داد. او در آزمایشات خود محدوده عدد ریچاردسون را $7 < Ri < 110$ در نظر گرفت. نتایج آزمایشات او نشان داد که با افزایش عدد ریچاردسون تا $Ri = 13$ ضریب شدت اختلاط کاهش یافته و بعد از آن ثابت می-شود. مطالعات آزمایشگاهی که توسط میدلتون (۱۹۹۲) انجام شده است، نشان می-دهد که پیشانی جریان غلیظ با وجود دارا بودن شکل ساده، ساختار پیچیده‌ای دارد. لانگ (۱۹۷۰) نشان داد در صورتی که ارتفاع مانع تقریباً ۲ برابر ارتفاع جریان غلیظ باشد باعث توقف آن می-شود. اوهی (۲۰۰۳) و اوهی و اشلایس (۲۰۰۴ و ۲۰۰۷) مطالعاتی بر روی راهکارهای کنترل جریان غلیظ با استفاده از مانع غیر مشبک، مانع مشبک به صورت شبکه ژئوتکستایل عمودی، جت عمودی، جت ۴۵ درجه و دیوار حباب انجام دادند. موریس و الکساندر (۲۰۰۳) مطالعاتی در مورد تغییر در جهت جریان در اثر یک مانع گوه‌ای شکل با دیواره قائم انجام دادند. نتایج حاصل از مطالعات آنها نشان داد که یک مانع نسبتاً کوچک می-تواند بر الگوی

$$U^2 h = \int_0^{\infty} u^2 dz = \int_0^{h_i} u^2 dz \quad [۳]$$

که در این روابط U سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ، h ارتفاع بدنه جریان غلیظ، $u(z)$ سرعت بدنه در هر فاصله از کف و h_i فاصله‌ای از کف می‌باشد که در آن سرعت جریان غلیظ برابر صفر است. ترنر (۱۹۷۳) معادله بقای جرم برای جریان غلیظ رسوبی را به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{dh}{dt} + \frac{d}{dx}(Uh) = W_h \quad [۴]$$

که در این رابطه W_h سرعت ورود سیال پیرامون به درون جریان غلیظ می‌باشد که می‌توان این پارامتر را متناسب با سرعت متوسط جریان دانست. در نتیجه رابطه‌ای به صورت زیر برای تعیین این پارامتر ارائه شده است:

$$\frac{dh}{dt} + \frac{d}{dx}(Uh) = E_w U \quad [۵]$$

که در این رابطه E_w ضریب شدت اختلاط می‌باشد. این ضریب بستگی به عدد ریچاردسون دارد. عدد ریچاردسون عکس عدد فرود دنیسی‌متریک در جریان غلیظ می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Ri = \frac{g'h \cos \theta}{u^2} = \frac{1}{Fr_d^2} \quad [۶]$$

در این رابطه θ زاویه شیب بستر می‌باشد. هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر کارگذاری زبری در ناحیه دیواره به منظور کنترل جریان غلیظ رسوبی و اثر آن بر ضریب شدت اختلاط آب پیرامون می‌باشد.

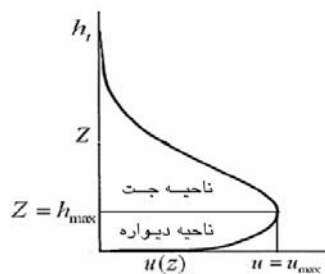
مواد و روش‌ها

جهت انجام آزمایش‌ها ابتدا سیال غلیظ با مخلوط کردن آب و پودر سنگ به غلظت دلخواه درون مخزن تهیه و توسط پمپ به یک مخزن به منظور رسیدن به هد ثابت منتقل شده، سپس با استفاده از یک شیر و دبی-

زبر به کار برد. ورجاوند (۱۳۹۲) بر روی تأثیر زبری روی ضریب شدت اختلاط جریان غلیظ نمکی و رسوبی مطالعاتی انجام داد و به این نتیجه رسید که در یک عدد ریچاردسون ثابت با افزایش ارتفاع زبری، ضریب شدت اختلاط افزایش می‌یابد.

شدت اختلاط سیال پیرامون

بدنه جریان غلیظ را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد. قسمت اول از کف بستر تا ارتفاعی که سرعت جریان غلیظ در آن بیشینه می‌شود (ناحیه دیواره) و قسمت دوم از جایی که سرعت جریان غلیظ بیشینه می‌باشد تا انتهای ارتفاع بدنه جریان غلیظ (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 (آلتیناکار و همکاران ۱۹۹۶). شکل ۲ شماتیکی از پروفیل سرعت و تقسیم‌بندی آن بر مبنای ناحیه دیواره و جت را نشان می‌دهد.



شکل ۲- شماتیکی از پروفیل سرعت در جریان غلیظ (آلتیناکار و همکاران ۱۹۹۶).

الیسون و ترنر (۱۹۵۹) با توجه به اینکه تفکیک جریان غلیظ از سیال پیرامون بسیار مشکل می‌باشد، روابط زیر را به منظور تخمین ارتفاع و سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ ارائه نمودند:

$$Uh = \int_0^{\infty} u dz = \int_0^{h_i} u dz \quad [۷]$$

قرار بگیرند بیشینه ارتفاع زبری برابر ۱/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و ارتفاع سایر زبری‌ها (۰/۵ و ۱ سانتی-متر) بر مبنای آن انتخاب گردید. قاعده زبری‌ها به صورت مربع $۱/۵ \times ۱/۵$ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین ۴ آزمایش در حالت بدون زبری و به‌عنوان آزمایش شاهد برای شیب‌های مورد نظر انجام شد. زبری‌ها در فاصله ۱/۲ متری از دریچه و به طول ۶ متر در کف فلوم کارگذاری شدند. برای تخلیه جریان غلیظ از انتهای فلوم از یک شیر استفاده گردید. همچنین در طول انجام آزمایش‌ها اختلاف دمای سیال غلیظ با سیال پیرامون در حدود ۳ درجه سلسیوس بود.

پروفیل سرعت جریان غلیظ توسط دستگاه *DOP2000* اندازه‌گیری می‌شد. این دستگاه تنها مؤلفه افقی بردار سرعت را اندازه‌گیری می‌کند. دستگاه شامل پروب‌های ساطع‌کننده و دریافت‌کننده سیگنال می‌باشد که به آنها مبدل سیگنال گفته می‌شود. در تحقیق حاضر با توجه به نیاز برداشت پروفیل بدنه جریان غلیظ در دو مقطع از مسیر حرکت جریان غلیظ، از دو پروب استفاده گردید. پروب مورد استفاده در این تحقیق دارای طول ۹۰ میلی‌متر، قطر ۵ میلی‌متر و فرکانس ۴ مگاهرتز می‌باشد. این دستگاه برای برداشت تعداد ۱۵۰ عدد سرعت لحظه‌ای در هر فاصله از پروب برای تحقیق حاضر تنظیم شد. همچنین زاویه قرارگیری پروب در آزمایشات ۶۵ درجه نسبت به افق در نظر گرفته شد. شیب‌های مورد استفاده در آزمایشات (صفر، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ درصد) بوده‌اند. انتخاب این شیب‌ها به گونه‌ای بوده است که جریان غلیظ در تمام آزمایش‌ها بر اساس عدد فرود دنیسی‌متریک (رابطه ۶) در حالت زیر بحرانی قرار داشته باشد. به‌منظور تعیین عدد رینولدز جریان از رابطه ۷ استفاده گردید.

$$Re = \frac{\rho_i U h}{\mu} \quad [7]$$

در این رابطه ρ_i جرم واحد حجم اولیه جریان غلیظ و μ لزوجت دینامیکی جریان غلیظ بوده که با لزوجت دینامیکی سیال پیرامون تقریباً برابر است (حسینی و همکاران ۲۰۰۶).

سنج الکترومغناطیس میزان جریان ورودی به درون فلوم کنترل می‌شد. محدوده کاربرد این دبی‌سنج از ۰/۱ تا ۲۰ لیتر بر ثانیه و دقت اندازه‌گیری آن از ± 0.5 تا ± 0.8 درصد می‌باشد. در کلیه آزمایش‌ها دبی جریان غلیظ ثابت و برابر ۰/۷ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین دو غلظت ۱۰ گرم در لیتر ($\rho_i = 1008 \text{ kg m}^{-3}$) و ۲۰ گرم در لیتر ($\rho_i = 1017 \text{ kg m}^{-3}$) از جریان غلیظ رسوبی مورد استفاده قرار گرفت. فلوم مورد استفاده با یک دریچه در ابتدا به دو قسمت تقسیم و بدین وسیله سیال غلیظ از سیال پیرامون جدا شده و در هنگام شروع آزمایش با استفاده از یک اهرم این دریچه تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر بالا رفته و سیال غلیظ وارد سیال پیرامون می‌شد. اندازه بازشدگی دریچه بر مبنای جلوگیری از اغتشاش جریان غلیظ به دلیل سرعت زیاد هنگام خروج از زیر دریچه انتخاب گردید.

برای دانه‌بندی مصالح مورد استفاده از دستگاه Mastersizer استفاده شد. دامنه اندازه‌گیری این دستگاه از ۰/۰۲ تا ۲۰۰۰ میکرومتر با دقت ۱ درصد می‌باشد. اندازه متوسط ذرات (D_{50}) برابر ۱۷ میکرومتر، D_{84} برابر ۶۳ میکرومتر و D_{16} برابر ۳ میکرومتر می‌باشد. همچنین انحراف معیار هندسی ($\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}}$) برابر ۴/۵ می‌باشد که نشان‌دهنده غیریکنواخت بودن مصالح مورد استفاده می‌باشد.

نظر به اهداف تحقیق یعنی بررسی تأثیر زبری بر روی کنترل جریان غلیظ و ضریب شدت اختلاط در ناحیه دیواره به‌منظور تعیین ارتفاع زبری‌های مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها، ابتدا یک آزمایش که در آن کمترین z_{max} شکل بگیرد با شیب طولی ۳/۵ درصد و غلظت ۲۰ گرم در لیتر ($\rho_i = 1017 \text{ kg m}^{-3}$) انجام شد. بلندترین ارتفاع زبری مورد استفاده در این تحقیق از z_{max} در این حالت کمتر در نظر گرفته شده است. برای شرایط این آزمایش معادل ۱/۷ سانتی‌متر حاصل شد. در نتیجه برای اینکه کلیه زبری‌ها در ناحیه دیواره

که در این رابطه Q_s دبی پیشانی جریان غلیظ رسوبی، U_f سرعت پیشانی جریان غلیظ، H_f ارتفاع پیشانی جریان غلیظ، B عرض فلوم و C متوسط غلظت حجمی پیشانی جریان غلیظ می‌باشد.

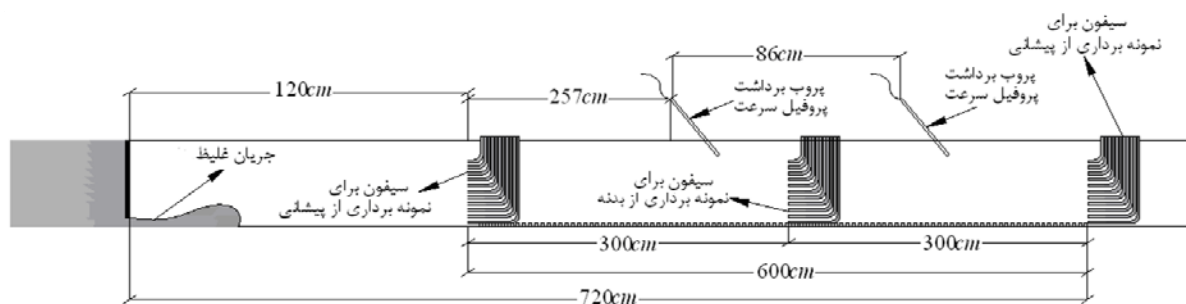
برای نمونه‌برداری از پیشانی جریان غلیظ از سیفون استفاده گردید. سیفون‌ها قبل و بعد از محدوده کارگذاری زبری قرار گرفتند. نمونه‌گیری از پیشانی جریان غلیظ در دو نقطه از عمق در هر محل انجام شد. در شکل ۳ محل قرارگیری پروب‌های سرعت و سیفون‌ها مشخص شده است.

با توجه به این موضوع که جریان در بدنه جریان غلیظ به صورت یکنواخت فرض می‌شود، می‌توان از ترم $\frac{dh}{dt}$ در معادله ۵ صرف‌نظر کرده و با استفاده از تفاضل محدود رابطه‌ای به صورت زیر برای تعیین E_w ارائه نمود:

$$E_w = \left(\frac{2}{U_{J+1} + U_J} \right) \left(\frac{Uh_{J+1} - Uh_J}{X_{J+1} - X_J} \right) \quad [8]$$

که در این رابطه J و $J+1$ بیان‌گر دو مقط متوالی می‌باشند. دبی پیشانی جریان غلیظ رسوبی مطابق رابطه ۹ تعیین گردید.

$$Q_s = U_f \times H_f \times B \times C \quad [9]$$



شکل ۳- محل قرارگیری پروب‌های سرعت و سیفون‌ها.

$$f(U, W_h, k_s, h, S, g, \rho_a, \rho_s, \nu_s) = 0 \quad [11]$$

که در این رابطه k_s ارتفاع زبری، S شیب کف، ν_s لزوجت سینماتیکی جریان غلیظ و ρ_s جرم واحد حجم مصالح مورد استفاده می‌باشد. سایر پارامترهای فوق در قسمت‌های قبل معرفی شده‌اند. پس از در نظر گرفتن متغیرهای تکراری و انجام تحلیل ابعادی با استفاده از روش π باکینگهام رابطه ۱۲ به شرح زیر حاصل شد:

$$f\left(\frac{W_h}{U}, \frac{k_s}{h}, Ri, Re\right) = 0 \quad [12]$$

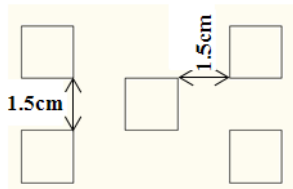
با استفاده از رابطه ۱۰، درصد کاهش دبی پیشانی جریان غلیظ برآورد گردید.

$$\% \Delta Q_s = \frac{Q_{sb} - Q_{sa}}{Q_{sb}} \times 100 \quad [10]$$

که در این رابطه $\% \Delta Q_s$ درصد کاهش دبی پیشانی جریان غلیظ رسوبی، Q_{sb} دبی پیشانی جریان غلیظ رسوبی قبل از کارگذاری زبری و Q_{sa} دبی پیشانی جریان غلیظ رسوبی بعد از کارگذاری زبری می‌باشد. جهت ارائه رابطه‌ای به منظور پیش‌بینی ضریب شدت اختلاط با در نظر گرفتن تاثیر همزمان شیب و زبری، تحلیل ابعادی صورت پذیرفت. متغیرهای مورد نظر مطابق رابطه ۱۱ می‌باشد.

نتایج و بحث

در جدول ۱ محدوده اعداد رینولدز و فرود دنیسمتریک برای پیشانی و بدنه جریان غلیظ ارائه شده است. همان طور که در این جدول مشاهده می شود در تحقیق حاضر تمامی آزمایشات در حالت زیر بحرانی و آشفته قرار دارند. همچنین به منظور بررسی تاثیر زبری بر روی ضریب شدت اختلاط در شیب های مورد نظر، روند تغییرات این پارامتر در دو غلظت ۱۰ و ۲۰ گرم در لیتر در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۴- نحوه آرایش زبری ها.

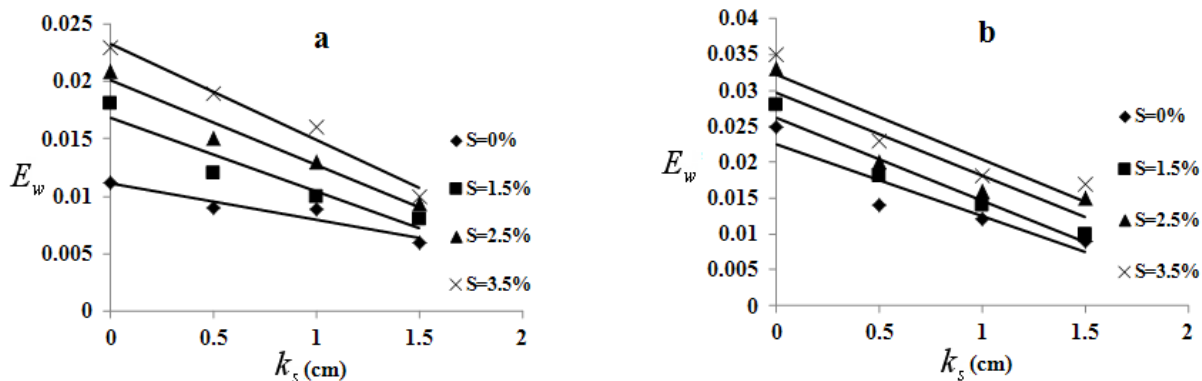
با توجه به روابط ۴ و ۵ می توان به جای عبارت $\frac{W_h}{U}$ ، پارامتر E_w را لحاظ کرد. در نتیجه می توان رابطه ۱۲ را به صورت زیر نوشت:

$$E_w = f\left(\frac{k_s}{h}, Ri, Re\right) \quad [13]$$

سرعت و ارتفاع پیشانی جریان غلیظ به کمک تکنیک فیلمبرداری توسط دوربین دیجیتال در طول آزمایشات تعیین گردیدند. سرعت و ارتفاع بدنه جریان غلیظ از روابط ۲ و ۳ و با توجه به پروفیل های سرعت برداشت شده از جریان غلیظ استخراج گردیدند. لازم به ذکر است با توجه به این موضوع که حرکت جریان غلیظ بلافاصله بعد از خروج از دریچه تحت تاثیر دبی ورودی سیال غلیظ باشد لذا سرعت پیشانی و بدنه جریان غلیظ از فاصله ۲ متری از دریچه به بعد برداشت شدند. نحوه آرایش زبری ها به صورت زیگزاگ با فاصله طولی و عرضی ۱/۵ سانتی متر مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شد.

جدول ۱- محدوده اعداد فرود دنیسمتریک و رینولدز پیشانی و بدنه جریان غلیظ در آزمایش ها.

Re		Fr_d	
بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه
۳۶۰۰	۲۱۰۰	۰/۹۰	۰/۳۷



شکل ۵- تغییرات ضریب اختلاط در مقابل افزایش ارتفاع زبری (a: غلظت ۱۰ گرم در لیتر و b: غلظت ۲۰ گرم در لیتر).

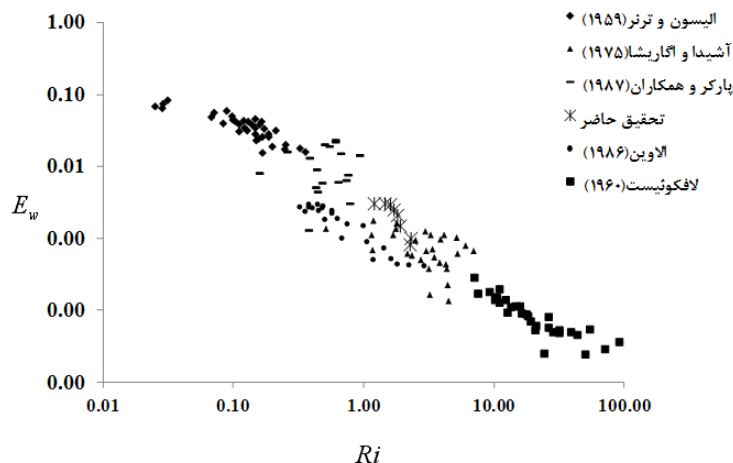
۱- افزایش زبری باعث کاهش سرعت و این کاهش منجر به افزایش عدد ریچاردسون و در نتیجه کاهش ضریب شدت اختلاط می‌گردد.

۲- افزایش زبری باعث افزایش تلاطم در فصل مشترک جریان غلیظ با سیال پیرامون گشته که این تلاطم اضافی منجر به افزایش ورود سیال پیرامون به درون جریان غلیظ و افزایش ضریب شدت اختلاط می‌شود.

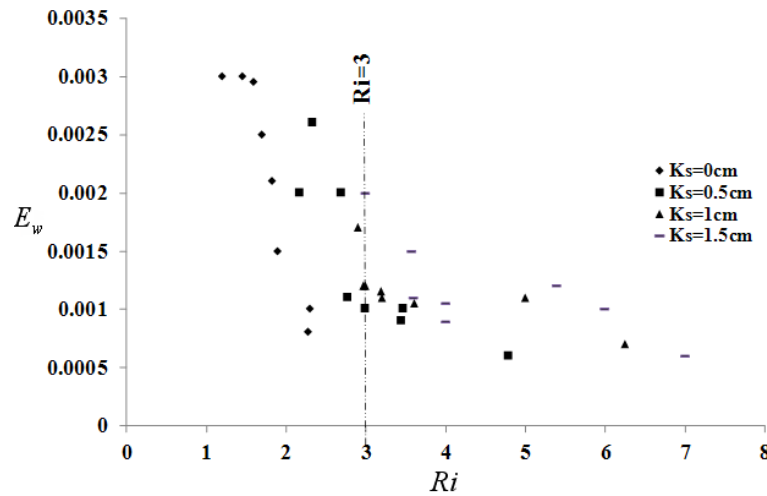
نکته مهم و قابل بحث در خصوص شکل ۷ این است که در عدد ریچاردسون یکسان، افزایش ارتفاع زبری منجر به افزایش ضریب شدت اختلاط می‌شود. به‌عنوان مثال در عدد ریچاردسون ۳، افزایش زبری از ۰/۵ سانتی‌متر تا ۱ سانتی‌متر منجر به افزایش ضریب اختلاط به میزان حدود ۲۰ درصد و افزایش زبری از ۱ سانتی‌متر تا ۱/۵ سانتی‌متر منجر به افزایش ضریب شدت اختلاط به میزان تقریبی ۳۴ درصد شده است. نتایج مشابهی توسط فرناندز و ایمبرگر (۲۰۰۶) و ورجاوند (۱۳۹۲) گزارش گردیده است. اما سوال این است که زبری تأثیر بیشتری روی کاهش سرعت و افزایش عدد ریچاردسون و نهایتاً کاهش E_w دارد و یا اینکه تأثیر تلاطم ایجاد شده بر افزایش E_w بیشتر است. پاسخ به این سوال به‌کمک توسعه یک رابطه بین E_w ، Ri و $\frac{k_s}{h}$ و انجام تحلیل حساسیت تحلیل می‌گردد.

همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع زبری در هر شیب، میزان ضریب شدت اختلاط کاهش می‌یابد. به عنوان مثال برای شیب ۳/۵ درصد در غلظت ۱۰ گرم در لیتر به ازای افزایش ارتفاع زبری تا ۱/۵ سانتی‌متر در حدود ۴۸ درصد کاهش در ضریب شدت اختلاط ایجاد می‌شود. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با کاهش سرعت جریان به دلیل وجود زبری از تنش‌های برشی تولید شده بین سیال پیرامون و جریان غلیظ کاسته شده، لذا انرژی تولید شده ناشی از این تنش‌ها که عامل اساسی حرکت جریان سیال پیرامون به درون بدنه جریان غلیظ می‌باشد کاهش یافته و منجر به کاهش ضریب شدت اختلاط می‌شود.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها بدون زبری در تحقیق حاضر در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نتایج حاصل با نتایج تحقیقات سایرین مطابقت دارد. به‌منظور بررسی تأثیر زبری بر روی ضریب شدت اختلاط در شیب‌های مورد نظر، نتایج حاصل از آزمایش‌ها در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که افزایش زبری دو تأثیر مهم بر روی جریان غلیظ داشته که در مقابل یکدیگر عمل می‌کنند:



شکل ۶- تغییرات ضریب اختلاط در مقابل عدد ریچاردسون.



شکل ۷- نتایج حاصل از تغییرات ضریب اختلاط در مقابل عدد ریچاردسون با در نظر گرفتن زبری.

به منظور بررسی دقت رابطه ۱۴ 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 $(\alpha = \frac{E_{wm}}{E_{wp}})$.

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.

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

$$\% E = \frac{\sum_{i=1}^N |E_{wmi} - E_{wpi}|}{\sum_{i=1}^N E_{wmi}} \times 100 \quad [15]$$

۳- جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$) که به صورت زیر تعریف شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{wmi} - E_{wpi})^2}{N}} \quad [16]$$

معادله توسعه یافته برای ضریب شدت اختلاط

با توجه به رابطه ۸ مشاهده می‌شود که در محاسبه ضریب شدت اختلاط، دو پارامتر عمق و سرعت بدنه جریان غلیظ دارای اهمیت می‌باشد، افزایش عمق جریان غلیظ در مسیر حرکت به واسطه کشش سیال پیرامون اتفاق می‌افتد. همان‌طور که عنوان شد با توجه به اینکه در جریان غلیظ شتاب ثقل کاهش می‌یابد، وجود زبری به نوعی عامل افزایش ارتفاع بدنه جریان غلیظ می‌باشد. لذا منطقی به نظر می‌رسد که ضریب شدت اختلاط علاوه بر عدد ریچاردسون، با توجه به رابطه ۱۳ تابعی از زبری کف نیز باشد. به منظور تهیه مدل از ۳۲ سری اطلاعات موجود ۷۵٪ از آنها (۲۵ سری) به منظور ساخت مدل و ۲۵٪ از آنها (۷ سری) به منظور آزمون مدل مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از نرم افزار SPSS، رابطه‌ای به صورت زیر حاصل شد:

$$E_w = \frac{0.004 + 0.009 \left(\frac{k_s}{h} \right)}{Ri^{1.36}} \quad [14]$$

$1.2 < Ri < 7$

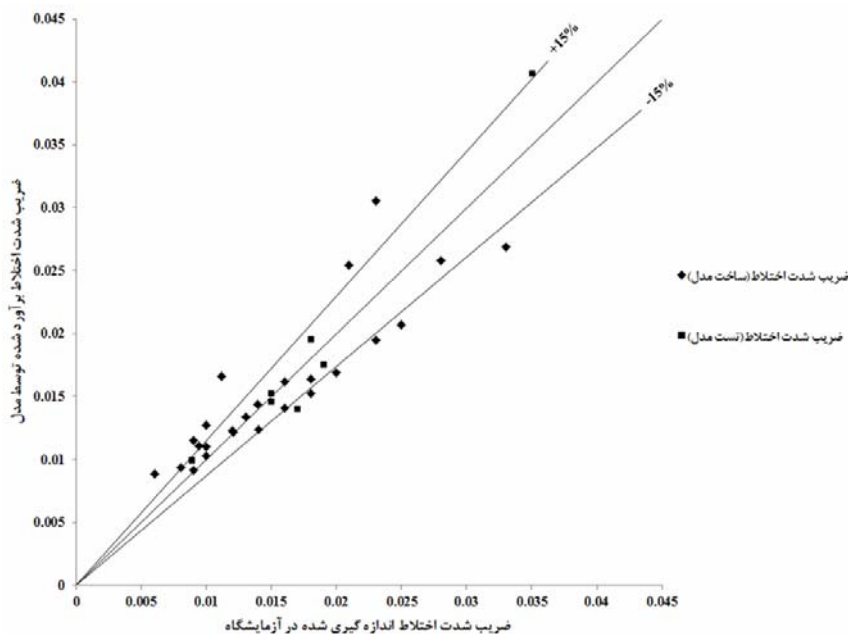
در دو مرحله ساخت و آزمون مدل و در محدوده $\pm 15\%$ صورت پذیرفته است.

جدول (۲) - نتایج حاصل از تحلیل آماری دقت رابطه ۱۴.

$RMSE$	$\%E$	α	R^2	
۰/۰	۱۰/۴	۱/۰	۰/۹	رابطه ۱۴

که در این روابط، N تعداد داده‌ها، E_{wm} ضریب شدت اختلاط جریان غلیظ اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و E_{wp} ضریب شدت اختلاط جریان غلیظ 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 ۲ ارائه شده است.

با توجه به جدول فوق به نظر می‌رسد مدل توسعه یافته با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی میزان ضریب اختلاط می‌باشد. لازم به ذکر است این مدل در مورد جریان های غلیظ رسوبی در حالت متلاطم صادق می‌باشد. در شکل ۸ مقایسه دیگری بین مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و پیش‌بینی شده توسط مدل



شکل (۸) - مقایسه ضریب اختلاط برآورد شده توسط رابطه ۱۴ در مقابل ضریب شدت اختلاط اندازه‌گیری شده در محدوده خطا. $\pm 15\%$.

تحلیل حساسیت

به منظور تعیین میزان اهمیت هر یک از متغیرهای وابسته موجود در رابطه ۱۴ در تعیین ضریب شدت اختلاط، با استفاده از داده‌های موجود تحلیل حساسیت صورت پذیرفت. برای این منظور از روش

با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که محدوده نسبتاً قابل قبولی در بازه مورد نظر قرار گرفته است. به نحوی که در حدود ۸۵ درصد از داده‌های موجود در مرحله آزمون مدل در بازه مذکور قرار دارند.

رخ می‌دهد. البته در مقادیر $\frac{k_s}{h}$ پایین‌تر، میزان ضریب کشش کمتر می‌باشد. در نتیجه می‌توان این‌گونه بیان کرد که در تحقیق حاضر تأثیر عدد ریچاردسون در برآورد ضریب شدت اختلاط در حدود ۴ برابر تأثیر $\frac{k_s}{h}$ در بیشترین میزان خود می‌باشد. در شکل ۹ روند تغییرات کاهش دبی پیشانی جریان غلیظ رسوبی ناشی از وجود زبری در مسیر جریان برای دو غلظت ۱۰ و ۲۰ گرم در لیتر ارائه شده است. همان‌طور که در شکل-های فوق مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع زبری، درصد کاهش دبی جریان غلیظ رسوبی در هر دو غلظت ۱۰ و ۲۰ گرم در لیتر افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال در شیب ۰ درصد به ازای افزایش زبری تا ۱/۵ سانتی‌متر در غلظت ۱۰ گرم در لیتر در حدود ۷۰ درصد کاهش در میزان دبی پیشانی جریان غلیظ ایجاد شده‌است. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با افزایش ارتفاع زبری به دلیل مقاومت ایجاد شده ناشی از آن از سرعت جریان غلیظ کاسته می‌شود. به‌همین دلیل رسوبات فرصت بیشتری برای ته‌نشینی خواهند داشت. این کاهش غلظت علاوه بر کاستن از میزان دبی جریان غلیظ رسوبی، منجر به کاهش غلظت جریان غلیظ در مسیر حرکت شده و در نتیجه از اختلاف جرم واحد حجم جریان غلیظ و سیال پیرامون که عامل اصلی حرکت جریان غلیظ می‌باشد، کاسته می‌شود. این موضوع نیز می‌تواند کاهش سرعت و به دنبال آن کاهش دبی جریان غلیظ رسوبی را به‌همراه داشته باشد. البته باید توجه داشت با افزایش شیب تأثیر زبری در افزایش درصد کاهش دبی پیشانی جریان غلیظ رسوبی کاهش می‌یابد که دلیل این موضوع افزایش سرعت جریان غلیظ به واسطه افزایش شیب می‌باشد.

ضریب کشش^۱ استفاده گردید. در این روش اگر A متغیر مستقل و B متغیر وابسته باشد آنگاه برای تعیین میزان اثر A بر روی B رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\varepsilon_{B,A} = \frac{\partial B}{\partial A} \times \frac{A}{B} \quad [17]$$

که در این رابطه $\varepsilon_{B,A}$: ضریب کشش A بر روی B می‌باشد. نتایج حاصل از این روش بیان می‌دارد که ۱ درصد افزایش در هر یک از متغیرهای مستقل چند درصد تغییر در متغیر وابسته ایجاد می‌کند. پس از انجام تحلیل حساسیت با استفاده از روش فوق بر روی رابطه ۱۴، نتایج زیر حاصل گردید:

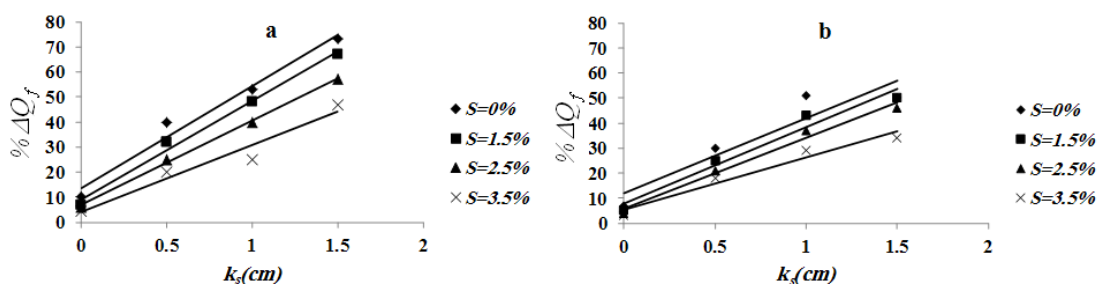
$$\varepsilon_{E_w, Ri} = -1.36 \quad [18]$$

$$\varepsilon_{E_w, \frac{k_s}{h}} = \frac{(\frac{k_s}{h})}{0.45 + (\frac{k_s}{h})} \quad [19]$$

رابطه ۱۸ نشان می‌دهد که تأثیر عدد ریچاردسون بر روی ضریب شدت اختلاط، مقداری ثابت می‌باشد. این رابطه بیان می‌دارد که به ازای ۱ درصد افزایش در عدد ریچاردسون، ۱/۳۶ درصد کاهش در ضریب شدت اختلاط رخ می‌دهد.

رابطه ۱۹ بیان‌گر این موضوع می‌باشد که تأثیر پارامتر $\frac{k_s}{h}$ بر روی ضریب شدت اختلاط به‌صورت یک تابع غیرخطی می‌باشد. این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش $\frac{k_s}{h}$ ، ضریب کشش نیز افزایش می‌یابد. به نحوی که در بیشترین میزان $\frac{k_s}{h}$ در تحقیق حاضر که برابر ۰/۲۵ است، ضریب کشش در حدود ۰/۳۵ درصد می‌باشد. بدین معنی که در این حالت با افزایش ۱ درصد در $\frac{k_s}{h}$ ، ۰/۳۵ درصد افزایش در ضریب شدت اختلاط

^۱ Elasticity coefficient



شکل ۹- تغییرات درصد کاهش دبی پیشانی جریان غلیظ رسوبی در مقابل افزایش ارتفاع زبری (a: غلظت ۱۰ گرم در لیتر و b: غلظت ۲۰ گرم در لیتر).

نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر تأثیر زبری بر روی کنترل جریان غلیظ و ضریب شدت اختلاط مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور آزمایش‌ها با در نظر گرفتن ۴ شیب، ۴ ارتفاع زبری و ۲ غلظت صورت پذیرفت. مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- در یک شیب ثابت افزایش ارتفاع زبری منجر به کاهش ضریب شدت اختلاط می‌شود که این کاهش از ۵۰ تا ۶۰ درصد در غلظت ۱۰ گرم در لیتر ($\rho_t = 1008 \text{ kg m}^{-3}$) و از ۴۸ تا ۶۰ درصد در غلظت ۲۰ گرم در لیتر ($\rho_t = 1017 \text{ kg m}^{-3}$) می‌باشد.

- افزایش ارتفاع زبری در هر شیب منجر به کاهش قابل توجهی در میزان دبی جریان غلیظ رسوبی می‌شود که این درصد کاهش از ۴۰ تا ۷۰ درصد در غلظت ۱۰ گرم در لیتر و از ۳۵ تا ۵۵ درصد در غلظت ۲۰ گرم در لیتر می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نويسندگان از واحد پژوهشی دانشگاه و دانشکده مهندسی علوم آب به دلیل در اختیار گذاشتن امکانات تشکر می‌نمایند. همچنین لازم است از سازمان آب و برق خوزستان (معاونت سد و نیروگاه) به دلیل حمایت مالی تشکر و قدردانی گردد.

منابع مورد استفاده

کاهه م، ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی دینامیک جریان غلیظ بر روی سطوح زبر. رساله دکتری تخصصی سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

ورجاوند پ، ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی جریان غلیظ بر روی بسترهای زبر. رساله دکتری تخصصی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.

- Altinakar MS, Graf WH and Hopfinger EJ, 1996. Flow structure in turbidity currents. *Journal of Hydraulic Research* 34(5):713-718.
- Ellison TH and Turner JS, 1959. Turbulent entrainment in stratified flows. *Journal of Fluid Mechanic* 6(3):423-448.
- Fernandez RL and Imberger J, 2006. Bed roughness induced entrainment in a high Richardson number underflow. *Journal of Hydraulic Research* 44(6): 725-738.
- Garcia MH, 1992. Turbidity Currents. *Encyclopedia of Earth System Science*. Academic Press, San Diego 4: 399-408.
- Hosseini SA, Shamsai A and Ataie-Ashtiani B, 2006. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter. *Flow Measurement and Instrumentation* 17(1):59-68.
- Lofquist K, 1960. Flow and stress near an interface between stratified liquids. *Physic Fluids* 3(2):158-175.
- Long RR, 1970. Blocking effects in flow over obstacles. *Tellus* 22: 471-480.
- Middleton GV, 1992. Sediment deposition from turbidity currents. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences* 21: 89-114.
- Morris SA and Alexander J, 2003. Changes in flow direction at a point caused by obstacles during passage of a density current. *Journal of Sedimentary Research* 73: 621-629.
- Oehy Ch, 2003. Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents. Communication No.15 of the Laboratory of Hydraulic Structions LCH. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL. Switzerland 317 pp.
- Oehy Ch, and Schleiss A, 2004. Management of reservoir sedimentation due to turbidity currents by technical measures. *Hydraulics of Dams and River Structures* 3(2): 263-270.
- Oehy Ch and Schleiss A, 2007. Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(6): 637-648.
- Sequeiros OE, Naruse H, Endo N, Garciaand MH, and Parker G, 2009. Experimental study on self-accelerating turbidity currents. *Journal of Geophysical Research* 114: 16-42.
- Sequeiros OE, Spinewine B, Beaubouef RT, Sun T, García MH, 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, ASCE* 136(7): 412-443.
- Turner JS, 1973. *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge University Press London, U.K.