

بررسی آزمایشگاهی ضخامت و پروفیل‌های سرعت جریان گل آلود

شیوا کشتکار^۱ - سید علی ایوب زاده^{۲*} - بهار فیروزآبادی^۳

تاریخ دریافت: ۸۸/۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۸۹/۷/۱۱

چکیده

از جمله اقداماتی که می‌تواند مقدار انباشتگی رسوبات در مخازن سدها را کاهش دهد تخلیه موثر جریان‌های سیلابی با استفاده از هیدرودینامیک جریان‌های گل آلود می‌باشد. لذا شناخت فرآیندهای موثر در این نوع جریان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق اثر شیب کانال و عدد فرود جریان گل آلود ورودی در محدوده حالت‌های زیر تا فوق بحرانی (عدد فرود حدود ۰/۶ تا ۳/۶) بر روی ضخامت و پروفیل‌های سرعت جریان در حالت دو بعدی و در یک مدل فیزیکی بررسی شده است. مدل فیزیکی شامل فلومی به عرض ۲۰ سانتی‌متر، به طول ۱۲ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر است. کائولن با اندازه متوسط ذرات ۴/۵ میکرون به عنوان ماده رسوبی غیر چسبنده در این تحقیق استفاده شده است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود چگالی جریان گل آلود ورودی، مقادیر ضخامت جریان در طول زمان و همچنین در طول کانال افزایش می‌یابد. افزایش مقادیر ارتفاع بازشدگی در پیچه ورودی و همچنین افزایش مقادیر غلظت جریان گل آلود ورودی باعث کاهش ضخامت و افزایش سرعت جریان گل آلود می‌شوند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که عدد فرود چگالی بحرانی برابر ۰/۷ می‌باشد و ارتفاع معادل سرعت متوسط جریان در ارتفاعی برابر با ۰/۸ ضخامت متوسط جریان اتفاق می‌افتد.

واژه‌های کلیدی: بررسی آزمایشگاهی، پروفیل‌های سرعت، ضخامت جریان، جریان گل آلود

مقدمه

اثر رسوبگذاری از دست داده است (۴۱). در غالب موارد سعی می‌شود که با استفاده از نیروی هیدرودینامیکی آب، رسوبات ریزدانه خارج شوند. یکی از این روشها خارج کردن جریان سیلاب در قالب دینامیک جریان‌های گل آلود می‌باشد. بنابراین بررسی و مطالعه حرکت جریان‌های گل آلود در مخازن در جهت وصول به هدف فوق، اطلاعات گرانبهایی را در اختیار قرار خواهد داد.

بل در سال ۱۹۴۲ مطالعات آزمایشگاهی وسیعی را در زمینه بررسی جریان‌های گل آلود در فلوم‌های متعددی انجام داد. در طول سال ۱۹۵۰ و بعد از آن مسائل رسوبگذاری مخازن ناشی از جریان‌های گل آلود به صورت تئوری و آزمایشگاهی در بسیاری کشورها مطالعه شده است. تا کنون مشاهدات میدانی نه چندان زیادی در زمینه جریان‌های گل آلود انجام گرفته است (۱۵، ۱۶، ۱۷، ۲۴، ۲۷، ۲۸، ۴۵ و ۴۷) به دلیل دشواری و گرانی اندازه‌گیری‌های میدانی عمده بررسی‌های تجربی جریان گل آلود در آزمایشگاه صورت گرفته است. مدل‌های ریاضی این جریان‌ها در ۷۰ سال اخیر توسعه یافته‌اند و به دلیل فقدان شناخت کافی روی پارامترهای مختلف نظیر ضریب درون آمیختگی رسوب، معادلات به خوبی حل نشده‌اند (۲۶، ۳۴، ۳۷ و ۴۰).

احداث سد بر روی رودخانه باعث قطع انتقال رسوب شده و شرایط جریان ورودی به مخزن را کاملاً تغییر می‌دهد. مهمترین پدیده در این میان، رسوبگذاری در مخزن سد و کاهش حجم مفید آن است. تخمین زده شده است که تجمع رسوبات در مخازن سدها، سالانه یک درصد از حجم ذخیره آنها را کاهش می‌دهد (۴۲) و گفته شده هر ساله تقریباً ۲۰ میلیارد تن رسوبات توسط رودخانه‌های جهان انتقال یافته و در آبهای ساکن ته‌نشین می‌گردد (۲). حجم خاک فرسایش یافته در ایران حدود ۸۰۰ میلیون متر مکعب در سال تخمین زده شده است که سالانه بیش از یکصد میلیون متر مکعب از حجم مفید سدها را کاهش می‌دهد که این مقدار معادل بیش از ۳ تن رسوب در هر ثانیه می‌باشد (۱). در ایالات متحده میزان رسوبگذاری در مخازن سدها سالیانه به 1200×10^6 تن می‌رسد (۳). مخزن سد زونی در آمریکا حدود ۷۵ درصد ظرفیت خود را در مدت ۲۰ سال در

۱ و ۲ - دانشجوی دکتری و دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس

* - نویسنده مسئول: (Email: ayyoub@modares.ac.ir)

۳ - دانشیار گروه تبدیل انرژی، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

آلود تاثیر مستقیم داشته باشد تغییرات عدد فرود چگالی جریان گل آلود ورودی به مخزن سد می‌باشد که این تغییرات را می‌توان در قالب تغییرات ارتفاع دریچه ورودی جریان گل آلود ایجاد نمود (۸). در این تحقیق تاثیر تغییرات عدد فرود چگالی جریان گل آلود ورودی و شیب بر تغییرات ضخامت و پروفیل‌های سرعت این جریان به وسیله انجام آزمایشهایی مورد بررسی قرار گرفته است.

ساختار جریان‌های غلیظ

جریان غلیظ جریانی با چگالی (ρ_t) است که ذاتاً در اثر اختلاف چگالی ($\Delta\rho$) بر روی شتاب جاذبه (g) بوجود می‌آید. این جریان تا زمانی که جاذبه به وسیله نسبت $\Delta\rho/\rho_a$ کاهش یافته است رخ می‌دهد.

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

که ρ_t چگالی متوسط جریان و ρ_a ، چگالی سیال پیرامون است (۲۳). جریان غلیظ حاوی ذرات جامد معلق جریان گل آلود نامیده می‌شود (۴۴).

جریان گل آلود اغلب در هنگام سیلاب بوجود آمده و در محل برخورد رودخانه به مخزن سد جریان گل آلود در نقطه پلانچ به زیر آب مخزن فرو می‌رود و در کف مخزن جریان گل آلود ایجاد می‌گردد (۴۳) و چنانچه شیب کف زیاد باشد (بالتر از ۰/۰۰۱) و یا پهنای آن کم باشد به حرکت خود ادامه می‌دهد. در این حرکت ذرات درشت تر در ناحیه دلتا سقوط کرده و فقط جریان ذرات ریز باقی می‌ماند که می‌تواند به انتهای مخزن و ساختمان سد برسد (۱۹) و یا به مدت چند روز ادامه یابد و حتی در اقیانوسها به حرکت خود ادامه دهد (۲۹). چنین جریانی باید به اندازه کافی تولید آشفستگی بنماید تا بتواند مواد دانه‌ای را به صورت معلق حمل نماید (۲۳). چگالی متوسط یک جریان گل آلود با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\rho_t = C_s \rho_s + (1 - C_s) \rho_a = \rho_a + (\rho_s - \rho_a) C_s \quad (2)$$

که در آن C_s غلظت حجمی مواد دانه‌ای است که نسبت به عمق جریان متوسط گیری می‌شود. جهت پارامتری کردن جریان غلیظ عدد فرود چگالی جریان که **عبارتست** از نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ثقلی کاهش یافته به **صورت زیر نوشته می‌شود (۲۲):**

$$Fr_D = \frac{U}{\sqrt{g' h \cos \alpha}} \quad (3)$$

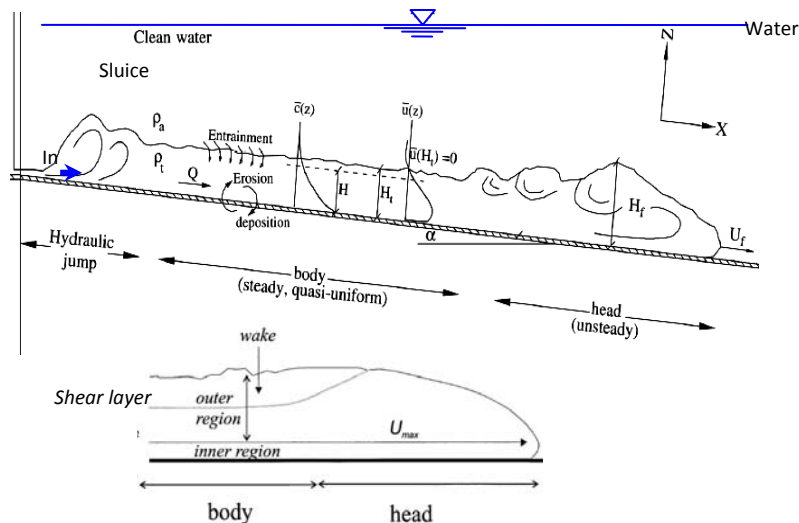
$$Ri = \frac{1}{Fr^2} = \frac{g' H \cos \alpha}{U^2} \quad (4)$$

معمولاً فصل مشترک بین جریان گل آلود و سیال محیطی به راحتی قابل تشخیص نیست و به همین دلیل یک ارتفاع H و یک سرعت U با استفاده از مقیاس انتگرال گیری از جریان داریم (۴۴):

دی سزار و همکاران (۱۴) در تحقیقات خود یک مدل عددی ارائه داده‌اند و نیز از یک مدل آزمایشگاهی استفاده کرده‌اند. همچنین در این تحقیق از مشاهدات میدانی مخزن لوزون در آلپ سویس استفاده شده است. مدل عددی برای جریان دو فازي جهت شبیه سازی جریان‌های گل آلود بوده است. تحقیق دیگری توسط پارکر (۳۶) نیز بر روی ضخامت جریان گل آلود و عدد فرود قبل و بعد نقطه پلانچ انجام شده که در آن اعداد فرود به صورت توابعی که فقط به میزان درون آمیختگی سیال پیرامون ارتباط دارد ارائه گردیده است. فوکوشیما (۲۱) نیز آزمایشاتی در حرکت جریان گل آلود سه بعدی انجام داده است که نتایج وی نشان می‌دهد که افزایش غلظت ورودی باعث افزایش گسترش عرضی می‌شود و در شیب‌های بالا این افزایش غلظت تاثیر چندانی از خود نشان نمی‌دهد. علویان (۱۰) جریان گل آلود آب نمک را به صورت سه بعدی بررسی کرده است و ذکر می‌کند که در فصل مشترک گردابه‌ها و توربولانس به شدت توسط چگالی اضافی مستهلک می‌شود. فلیکس و همکاران (۲۰) در یک مطالعه آزمایشگاهی اندازه‌گیری ترکیبی پروفیل سرعت و غلظت را در جریان گل آلود مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه دیگری کوبو و ناکاجیما (۳۱) بر روی مدل آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی آرایش موج رسوبی ناشی از جریان‌های گل آلود کار کرده‌اند. نتایج بدست آمده در راستای فهم نحوه شکل‌گیری موج رسوبی همراه با یک مدل عددی ارائه شده است. لی و یو (۳۲) مطالعات آزمایشگاهی وسیعی را روی جریان گل آلود انجام داده‌اند. در این آزمایشات مقدار عدد فرود بحرانی در نقطه پلانچ برابر با ۰/۸۸ در نظر گرفته شده و در زمانی که میزان عدد فرود این نقطه برابر با ۰/۶ شود نقطه پلانچ تغییر محل نمی‌دهد. مطالعه دو بعدی جریان گل آلود و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف از جمله شیب و عدد فرود چگالی ورودی بر پروفیل‌های سرعت و غلظت در مطالعه‌ای توسط کشتکار مورد توجه قرار گرفته است (۳۰). از جمله تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده دیگر در این زمینه می‌توان به مطالعات دو بعدی اشاره کرد (۱۲، ۱۳، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۹، ۴۶).

شفیعی (۶) با استفاده از مدل هیدرولیکی رودخانه و دریاچه پشت سد، خروج جریان‌های گل آلود را مورد بررسی قرار داد به گونه‌ای که مقدار رسوب خروجی و راندمان حاصل از آن نیز محاسبه شده. محمد نژاد و شمسانی (۹) مشخصه‌های جریان‌های گل آلود را مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند. عباسی (۵) راندمان تخلیه رسوبات مخزن را با مدل فیزیکی مورد بررسی قرار داد. راد و فیروزآبادی (۴) اثر عوامل متعدد در مشخصه‌های جریان چگالی دو بعدی را به صورت تجربی بررسی کرده‌اند. فیروزآبادی (۷) تاثیر پارامترهای مختلف بر مشخصه‌های جریان غلیظ سه بعدی و مغشوش حاوی ذرات ریز را به روش تجربی مطالعه کرده است.

مساله مهمی که می‌تواند روی هیدرودینامیک جریان‌های گل



شکل ۱- نمودار یک جریان گل آلود (۲۹)

عبور راس جریان گل آلود، ضخامت جریان در سرتاسر طول کانال اندازه گیری شده و سرعت‌های جریان در خط مرکزی کانال و در دو ایستگاه در طول کانال به فواصل ۴/۵ و ۵/۵ متری از ابتدای کانال توسط دو عدد سرعت سنخ صوتی ADV و در ۲۵ نقطه از عمق جریان اندازه‌گیری شده‌اند. شکل ۲ شماتیکی از کانال مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

در این تحقیق آزمایشات به صورت دو بعدی با غلظت‌های متفاوت جریان گل آلود ورودی و ارتفاع‌های متفاوت بازشدگی دریچه زیرگذر ورودی، به گونه‌ای طراحی شده‌اند که عدد فرود چگالی جریان گل آلود ورودی در حالت‌های فوق و زیر بحرانی قابل بررسی باشند. جدول ۱ مشخصات آزمایشات را نشان می‌دهد.

در جدول فوق Q مقدار دبی جریان گل آلود ورودی بوده و a میزان بازشدگی دریچه زیرگذر ورودی، S درصد شیب کانال، C0 غلظت جریان گل آلود ورودی، Fr_0 , Ri_0 , Re_0 به ترتیب اعداد رینولدز، ریچاردسون و فرود چگالی جریان گل آلود در زیر دریچه می‌باشند. در هر آزمایش ضخامت جریان گل آلود توسط خط کش‌های نصب شده بر جداره خارجی فلوم با دقت ۱ میلی‌متر قرائت شده‌اند. آزمایشات نشان می‌دهند که همانند جریان در کانال باز، اگر جریان با عدد فرود چگالی بالاتری وارد کانال گردد، عمق جریان بعد از پرش افزایش یافته و طبق معادله پیوستگی میزان سرعت متوسط جریان کاهش می‌یابد، که این مساله باعث افزایش پدیده درون آمیختگی ذرات آب به درون جریان گل آلود در طول مسیر شده و عمق جریان را در طول کانال افزایش می‌دهد. کاهش میزان غلظت جریان گل آلود ورودی و

$$UH = \int_0^{H_t} u dz = \int_0^{H_t} \bar{u} dz = \bar{U} H_t = q \quad (5)$$

$$U^2 H = \int_0^{H_t} u^2 dz = \int_0^{H_t} \beta \bar{U}^2 H_t dz = \beta \bar{U}^2 H_t H \quad (6)$$

که در آن: u_z سرعت نقطه‌ای و H_t (ضخامت کل جریان گل آلود) ارتفاع جایی است که سرعت در آنجا صفر است و U عبارتند از متوسط سرعت جریان و β نیز عبارتند از ضریب توزیع سرعت (بوسینیسک) است.

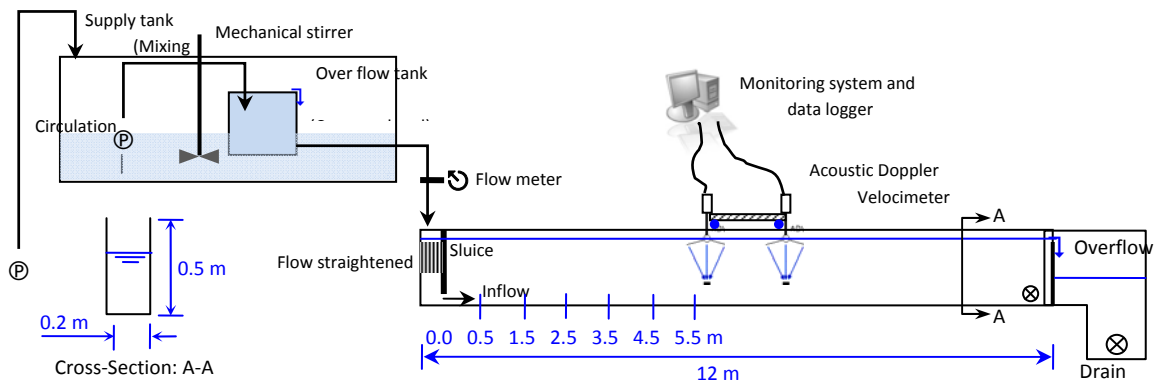
مواد و روش‌ها

در این تحقیق از کانالی به طول ۱۲ متر و عرض ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر استفاده شده است و در انتهای پایین دست کانال یک پله وجود دارد که بازگشت جریان گل آلود می‌گردد. در طول آزمایشات دبی ثابتی (۳۵ لیتر بر دقیقه) از جریان گل آلود به ابتدای کانال تزریق می‌شود. در ابتدای کانال نیاز است که یک محفظه برای جریان گل آلود تولید گردد که قبل از شروع آزمایش، جریان گل آلود را از آب صاف داخل کانال جدا کند. این امر توسط یک دیواره فلزی که در ابتدای کانال قرار دارد صورت می‌گیرد که حکم یک دریچه زیرگذر را دارد. ارتفاع بازشدگی این دریچه در این تحقیق در دو حالت ۴ و ۷ سانتی متر متغیر است و در طول آزمایشات جریان گل آلود از زیر این دریچه زیرگذر به درون کانال که قبلاً از آب صاف پر شده است و حکم مخزن سد را دارد، تزریق می‌گردد. مصالح رسوبی در این آزمایشات، کائولن با چگالی 2630 kg/m^3 و اندازه متوسط ذرات ۴/۵ میکرون به عنوان ماده رسوبی غیر چسبنده بوده است، که جریان گل آلود را با غلظت‌های مورد نظر در این تحقیق ایجاد نموده است. بعد از

مقدار عدد فرود بحرانی $0.45-0.55$ بدست آمده است [18]. همچنین در یک سری آزمایشات دو بعدی که روی کانال با شیب کم انجام شده مقادیر عدد فرود بحرانی $0.77-1$ بدست آمده است [38].

تاثیر عدد فرود جریان ورودی مشخصات جریان گل آلود در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل ضخامت مشاهداتی (h-vision) و ضخامت تعیین شده براساس عمقی که در آن سرعت جریان گل آلود (در پروفیل‌های قائم اندازه گیری شده سرعت طولی) برابر صفر بوده است (H)، مورد بررسی قرار گرفته است. جریان مطابق این شکل، بیشترین تغییرات عدد فرود ورودی بر ضخامت جریان در شیب کمتر (۱٪) اتفاق افتاده است و آن در زمانی است که جریان با رژیم فوق بحرانی وارد کانال می‌گردد.

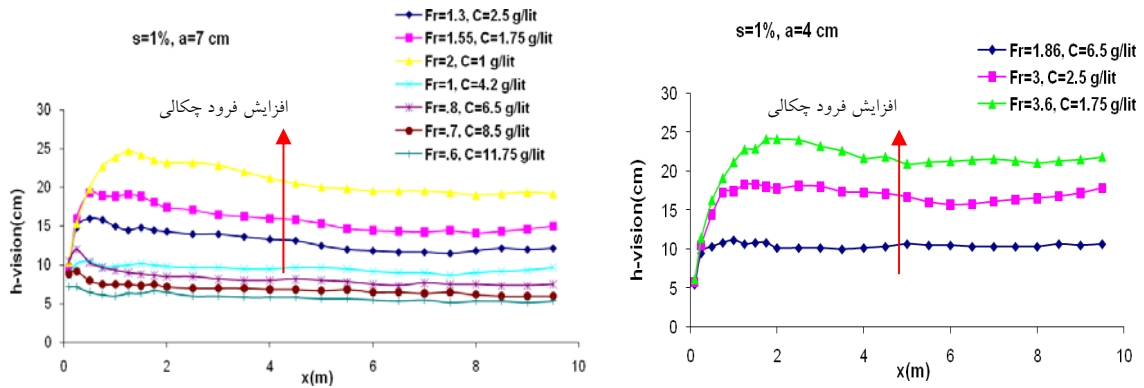
همچنین کاهش ارتفاع بازشدگی در نتیجه ورودی که موجب افزایش عدد فرود جریان گل آلود ورودی می‌گردند، می‌توانند دلیل افزایش ضخامت جریان گل آلود باشند (شکل ۳). بررسی دقیق‌تر شکل ۳ نشان می‌دهد که در عدد فرود ورودی 0.7 ضخامت جریان در طول کانال تقریباً ثابت بوده و برابر با ارتفاع بازشدگی در نتیجه زیر گذر ورودی بوده است. در واقع در فرودهای بزرگتر از این مقدار شاهد یک پرش هیدرولیکی کوچک می‌باشیم، براین اساس می‌توان عدد فرود 0.7 را به عنوان عدد فرود بحرانی برای جریان‌های گل آلود این تحقیق پیشنهاد داد. محققین مختلف اعداد فرود چگالی بحرانی مختلفی را برای جریان‌های گل آلود پیشنهاد داده‌اند، لی و یو (۳۲) در آزمایشات خود مقدار عدد فرود بحرانی را 0.88 بدست آورده‌اند. پارکر و همکاران (۳۵) مقدار این عدد را ۱ ذکر نموده‌اند. در تحقیق دیگری



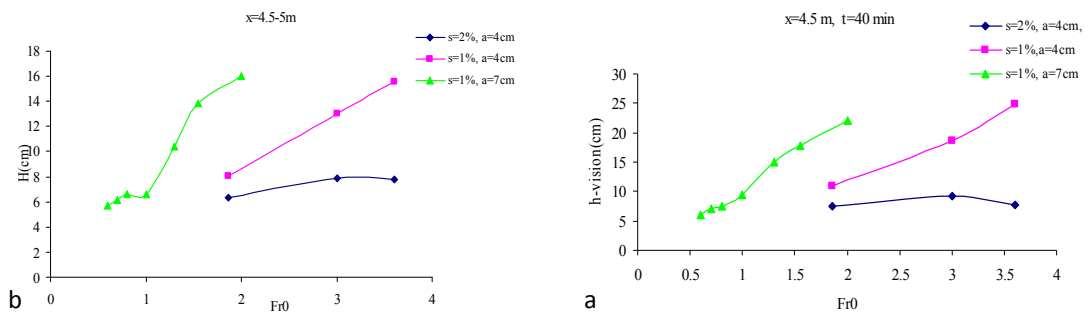
شکل ۲- شماتیکی از کانال آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر

جدول ۱- مشخصات آزمایشات

Exp. No	Q (L/s)	a (m)	S (%)	C_o (kg/m ³)	ρ_t (kg/m ³)	Fr _o	Ri _o	Re _o
TS2A4C65	0.58	0.04	2	6/5	1004/05	1/86	-0.29	2751/91
TS2A4C25	0.58	0.04	2	2/5	1001/56	3	-0.11	2759/13
TS2A4C175	0.58	0.04	2	1/75	1001/09	3/6	-0.08	2760/49
TS1A4C65	0.58	0.04	1	6/5	1004/05	1/86	-0.29	2751/91
TS1A4C25	0.58	0.04	1	2/5	1001/56	3	-0.11	2759/13
TS1A4C175	0.58	0.04	1	1/75	1001/09	3/6	-0.08	2760/49
TS1A7C25	0.58	0.07	1	2/5	1001/56	1/3	-0.59	2759/13
TS1A7C175	0.58	0.07	1	1/75	1001/09	1/55	-0.42	2760/49
TS1A7C1	0.58	0.07	1	1	1000/62	2	-0.25	2761/84
TS1A7C175	0.58	0.07	1	11/75	1007/32	-0.6	2/78	2742/38
TS1A7C85	0.58	0.07	1	8/5	1005/29	0.7	2/04	2748/28
TS1A7C65	0.58	0.07	1	6/5	1004/05	-0.8	1/56	2751/91
TS1A7C42	0.58	0.07	1	4/2	1002/62	1/00	1/00	2756/08



شکل ۳- نحوه تغییرات پروفیل طولی مشاهداتی جریان گل آلود با عدد فرود



شکل ۴- تاثیر تغییرات عدد فرود چگالی جریان ورودی بر ضخامت جریان گل آلود، (a) ضخامت مشاهده شده (h-vision) و (b) ضخامت متوسط جریان (H)

گرادیان منفی در اثر جریان رو به عقب سیال محیطی می‌باشد. در این ناحیه آشفتگی در اثر اختلاط با سیال ساکن بالایی حاصل می‌گردد. توزیع سرعت در این ناحیه یک توزیع نرمال گوسین می‌باشد.

در این بررسی سرعت‌های طولی در عمق در هر آزمایش در ۲ ایستگاه ۴/۵ و ۵/۵ متری از ابتدای کانال و در خط مرکزی عرض کانال توسط دو عدد دستگاه سرعت سنج صوتی، ADV، اندازه‌گیری شده است و از سرعت ماکزیمم (U_m) به عنوان یک سرعت مشخصه و ارتفاع متناظر با سرعت ماکزیمم (H_m) و ضخامت متوسط عمقی جریان گل آلود (H) به عنوان مقیاس‌های طولی و طول‌های مشخصه جهت بی‌بعد سازی پروفیل‌های سرعت استفاده شده است. بدیهی است روابط فرآیندها و قوانین حاکم بر آنها که هم در مقیاس‌های آزمایشگاهی (مدل فیزیکی) و هم در مقیاس‌های نمونه اصلی معتبر بوده و به عنوان معیارهای شبیه سازی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند، تنها در قالب پارامترهای بدون بعد قابل بیان هستند. لذا در اینجا پروفیل سرعت برای کلیه آزمایشات می‌تواند به شکل مطلوب و مناسبی به وسیله یک پروفیل بی‌بعد شده نمایش داده شود. به عبارت

نکته قابل توجه دیگری که در شکل ۴ دیده می‌شود، تاثیر شیب کف کانال بر روی مقادیر ضخامت جریان گل آلود است. در این تحقیق شیب کف کانال از ۱ به ۲ درصد افزایش یافته است، به نحوی که در تمام آزمایشات رژیم جریان ورودی در حالت فوق بحرانی ($Fr > 2$) قرار داشته است. کاهش ۱ درصد شیب کانال می‌تواند موجب افزایش شدید ضخامت جریان گل آلود بسته به میزان عدد فرود ورودی از ۶۰ تا ۱۰۰ درصد گردد، به نحوی که تاثیر شیب، زمانی که عدد فرود چگالی جریان ورودی بالاتر است، بارزتر می‌باشد.

نتایج اندازه‌گیری‌های سرعت نشان می‌دهد که پروفیل سرعت را می‌توان به دو ناحیه مشخص با رفتار متفاوت تقسیم نمود. ناحیه درونی و ناحیه بیرونی که به وسیله سرعت ماکزیمم (U_m)، از یکدیگر جدا می‌شوند. ناحیه داخل یا همان ناحیه دیوار گردان مثبت داشته و آشفتگی در اثر زبری کف تولید می‌گردد. در این ناحیه رسوبات از کف مکیده شده و توزیع سرعت در این ناحیه یک توزیع لگاریتمی می‌باشد، همچنین ضخامت این لایه کمتر از نصف ضخامت لایه بیرونی است. ناحیه بیرونی گردان منفی داشته که این

$$\frac{u(z)}{U_m} = \exp[-0.845 \left(\frac{z - H_m}{H - H_m}\right)^{2.16}] \quad (10)$$

در آزمایشاتی که جریان با رژیم زیر بحرانی وارد کانال می‌شوند، پروفیل‌ها به نسبت پایدارتر بوده و تغییرات ضرایب کمتر می‌باشد، به گونه‌ای که ضریب α_v در محدوده ۴/۸۸۹-۲/۳۳ تغییر کرده و مقدار متوسط آن ۳/۸۸ می‌باشد. تغییرات ضریب β_v نیز بین ۰/۸۵۵ و ۰/۴۲۶ بوده که با متوسط ۰/۶۶۷ در تکمیل روابط استفاده خواهد شد. همچنین ضریب γ_v با مقدار متوسط ۲/۱۳۸ جهت استفاده در روابط ارائه می‌شود. بر این اساس معادلات (۷) و (۸) برای حالتی که جریان با رژیم زیر بحرانی وارد کانال می‌گردد، به صورت زیر بازنویسی شده‌اند.

$$\frac{u(z)}{U_m} = \left(\frac{z}{H_m}\right)^{\frac{1}{3.88}} \quad (11)$$

$$\frac{u(z)}{U_m} = \exp[-0.67 \left(\frac{z - H_m}{H - H_m}\right)^{2.14}] \quad (12)$$

مقایسه ضرایب نشان می‌دهد که در روابط ارائه شده فوق برای حالتی که جریان ورودی زیر و فوق بحرانی است، ضریب γ_v تقریباً ثابت باقی مانده و چندان حساسیتی به رژیم جریان ورودی ندارد. از مقایسه نمودارها (شکل ۵) چنین بر می‌آید که نسبت بین ارتفاع معادل سرعت حداکثر به ضخامت متوسط جریان (H_m/H) در مطالعه حاضر ۰/۳۷ می‌باشد که این مقدار توسط آلتیناکار ۰/۳ و توسط حسینی ۰/۴۷ بدست آمده است (۱۱ و ۲۵). همچنین از دیگر موارد مورد بحث در این مطالعه می‌توان به نسبت سرعت حداکثر به سرعت متوسط (U_m/U) و نسبت ضخامت کل به ضخامت متوسط جریان (H_t/H) اشاره کرد که به ترتیب ۱/۲ و ۱/۳۵ بدست آمده است. این مقادیر توسط آلتیناکار و همکاران (۱۲) به ترتیب ۱/۳ و ۱/۳ بدست آمده که با نتایج حاصل از این تحقیق مطابقت دارد. نکته قابل توجه دیگری که از معادلات می‌توان استخراج نمود این است که ارتفاع معادل سرعت متوسط برابر با ۰/۸ ضخامت متوسط جریان می‌باشد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق، فرآیند جریان گل آلود در قالب اثر عدد فرود چگالی جریان ورودی که در محدوده‌های ۰/۶ تا ۳/۵ تغییر پذیرفته است، از طریق تغییر میزان بازشدگی دریچه ورودی و تغییر غلظت جریان ورودی و همچنین شیب کانال، بر ضخامت و پروفیل سرعت جریان گل آلود در حالت دو بعدی و در یک مدل فیزیکی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد اگر جریان با عدد فرود چگالی فوق بحرانی وارد کانال گردد، عمق ثانویه ناشی از پرش هیدرولیکی بستگی به میزان عدد فرود چگالی جریان ورودی دارد و میزان سرعت متوسط جریان با افزایش ضخامت جریان گل آلود کاهش می‌یابد، که منجر به

دیگر شکل بی‌بعد شده پروفیل سرعت، برای کلیه آزمایشات با شرایط اولیه مختلف می‌بایستی شبیه هم بوده و کلیه سرعت‌های بی‌بعد شده در یک محدوده مشخص و معین پراکنده شده باشند.

جهت بی‌بعد سازی پروفیل‌ها به این روش، آزمایشات را به دو دسته، آزمایشاتی با فرود ورودی زیر بحرانی و آزمایشاتی با فرود ورودی فوق بحرانی تقسیم کرده و برای هر دسته یک رابطه بی‌بعد ارائه خواهیم داد. پروفیل‌های سرعت بی‌بعد شده در لبه بالایی جریان پراکندگی بیشتری را نشان می‌دهند که این موضوع به دلیل رفتار غیر دائمی جریان در این ناحیه می‌باشد. در ناحیه داخلی درگ در مرز پایینی پارامتر کنترل کننده اصلی بوده و پروفیل سرعت به شکل رابطه تجربی زیر می‌باشد.

$$\frac{u(z)}{U_m} = \left(\frac{z}{H_m}\right)^{\frac{1}{\alpha_v}} \quad (7)$$

که در آن U_m سرعت ماکزیمم و H_m ارتفاع متناظر با سرعت ماکزیمم و $u(z)$ سرعت متوسط زمانی در جهت طول (در جهت محور x ها) و α_v یک مولفه تجربی می‌باشد.

تاثیر درگ در مرز بالایی بر پروفیل سرعت به وسیله مدل‌سازی یک لایه چگال طبقه‌ای با ضخامت محدود بین دو سیال هموزن شبیه سازی می‌گردد. بر این اساس توزیع سرعت در ناحیه بیرونی به وسیله یک رابطه شبه گوسین به شکل زیر مشخص می‌شود.

$$\frac{u(z)}{U_m} = \exp[-\beta_v \left(\frac{z - H_m}{H - H_m}\right)^{\gamma_v}] \quad (8)$$

نتایج نشان می‌دهد که در آزمایشاتی که در آنها جریان با رژیم فوق بحرانی وارد کانال شده است، تغییرات ضریب α_v تقریباً زیاد بوده و از ۳/۰ تا ۶/۰ در آزمایشات مختلف متغیر است، که این مقدار توسط آلتیناکار و همکاران (۱۲) برابر با ۶ ذکر شده است. مقدار متوسط این ضریب برای این دسته از آزمایشات در این تحقیق ۴/۸۲۷ پیشنهاد می‌گردد. تغییرات زیاد این ضریب می‌تواند به دلیل وجود تاثیر برش در کف بر روی پروفیل‌های سرعت بوده باشد و گرادیان بالای سرعت در این منطقه دقت را در محاسبه و ارائه این ضریب کاهش می‌دهد. مقدار متوسط ضریب β_v ، ۰/۸۴۵، برای استفاده در رابطه پیشنهاد می‌گردد و این ضریب توسط آلتیناکار ۱/۴ پیشنهاد شده است و همچنین مقدار متوسط ضریب γ_v ، ۲/۱۶۲، برای تکمیل معادلات ارائه خواهد شد، که مقدار پیشنهاد شده آن توسط آلتیناکار ۲ بوده است. لازم به ذکر است که آزمایشات انجام شده توسط آلتیناکار نیز بر روی جریان با اعداد فرود، ۱-۲/۳۳ بوده است. معادلات برای قسمت درونی و بیرونی جریان در این قسمت توسط متوسط ضرایب پیشنهادی دوباره بازنویسی شده است.

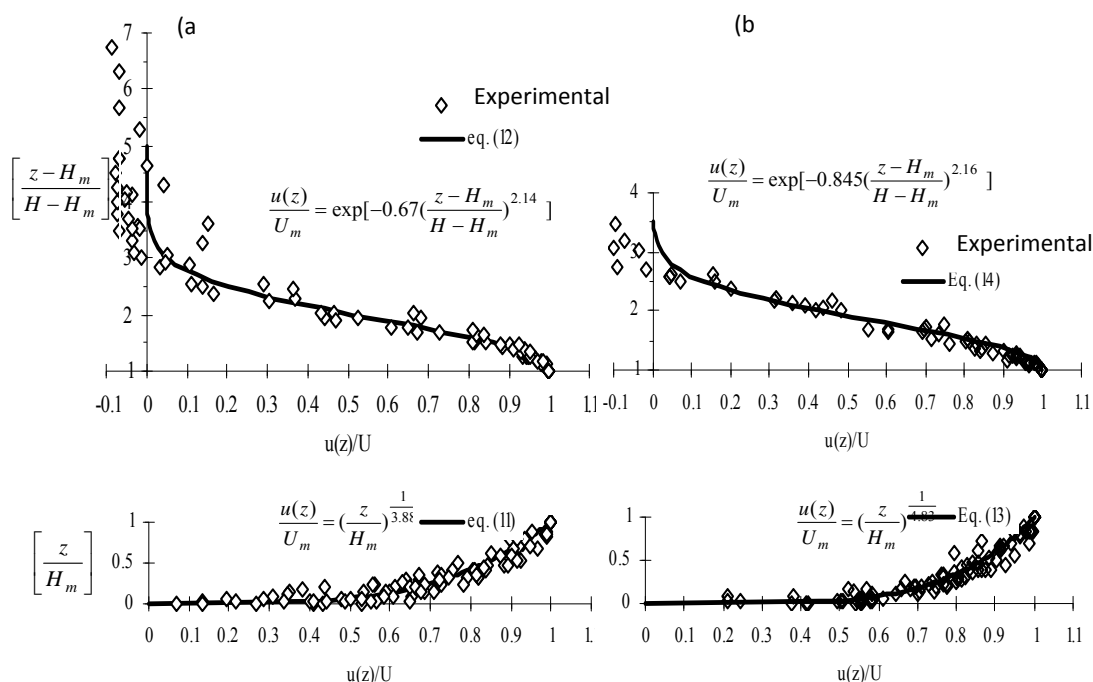
$$\frac{u(z)}{U_m} = \left(\frac{z}{H_m}\right)^{\frac{1}{4.83}} \quad (9)$$

نسبت ضخامت کل جریان به ضخامت متوسط جریان تقریباً $1/35$ بوده است. در تمام آزمایش‌ها نسبت سرعت حداکثر جریان گل آلود به سرعت متوسط جریان در حدود $1/2$ و همچنین نسبت ارتفاع نظیر سرعت ماکزیمم به ضخامت متوسط جریان در محدوده $0/4-0/6$ بوده است.

در پایان به منظور تکمیل و تدقیق نتایج حاصل از این تحقیق، آزمایش‌های تکمیلی به منظور مطالعه و آنالیز جزئیات مربوط به ویژگی‌های هیدرودینامیکی جریان توربولانس و به صورت کاملاً سه بعدی در جریان گل آلود توصیه می‌شود.

افزایش آمیختگی ذرات آب به درون جریان گل آلود شده و عمق جریان را در طول کانال افزایش می‌دهد. نتایج حاکی از این مطلب می‌باشند که عدد فرود چگالی بحرانی کمتر از ۱ بوده و در این مطالعه فرود چگالی بحرانی $0/7$ بوده است.

همچنین نتایج نشان می‌دهند که افزایش عدد فرود ورودی موجب کاهش مقادیر متوسط سرعت جریان گل آلود شده است. نکته قابل توجه این است که ارتفاع نظیر سرعت حداکثر (H_m) تحت تاثیر ارتفاع بازشدگی دریاچه زیرگذر ورودی نبوده است. از آزمایش‌های انجام شده معلوم گردید که ارتفاع معادل با سرعت متوسط در لایه بیرونی پروفیل سرعت تقریباً $0/8$ ضخامت متوسط جریان و همچنین



شکل ۵- پروفیل بی بعد سرعت (a) در جریان ورودی زیر بحرانی (b) در جریان ورودی فوق بحرانی

منابع

- ۱- اکرمی ا. ۱۳۷۵. وضعیت رسوبگذاری در سدهای ایران و مقایسه آن با روشهای تئوریک. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی آبیاری. دانشکده کشاورزی. دانشگاه تربیت مدرس.
- ۲- تربین ع. ۱۳۸۳. شبیه سازی عددی رسوب گذاری در مخازن سدها با مدل‌های یک بعدی، شبه دو بعدی و سه بعدی. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران. سازه‌های هیدرولیکی. دانشکده فنی دانشگاه تربیت مدرس.
- ۳- چاپلیقی ا. ۱۳۸۰. بررسی راندمان تله اندازی رسوب در سدهای تاخیری با استفاده از مدل فیزیکی. پایان نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری. دانشکده کشاورزی. دانشگاه تربیت مدرس.
- ۴- راد م. و فیروزآبادی ب. ۱۳۷۶. بررسی تجربی و عددی جریان غلیظ و کاربرد آن در رسوب زدایی مخازن سدها. طرح پژوهشی. وزارت نیرو. سازمان مدیریت منابع آب.
- ۵- شبان عباسی ص.، خانجانی م.ج. و بارانی غ. ۱۳۸۱. بررسی راندمان تخلیه رسوب با مدل بندی فیزیکی جریان چگال تحتانی دریاچه سد.

- مجموعه مقالات ششمین کنفرانس مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۳۱۵-۱۳۲۱.
- ۶- شفیعی ع. و خانجانی م.ج. ۱۳۷۶. بررسی تخلیه رسوب در مخازن سدها به وسیله یک مدل فیزیکی. نشریه دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد. سال ۹. شماره ۱. ۴۳-۳۶.
- ۷- فیروز آبادی ب.، موسوی حکمتی س.م.ر. و راد م. ۱۳۸۴. بررسی تجربی ساختار جریان گل آلود سه بعدی مغشوش. مجله هیدرولیک. جلد اول شماره ۲. پاییز ۱۳۸۴. ۴۴-۲۹.
- ۸- کشتکار ش. ۱۳۸۷. مطالعه آزمایشگاهی تاثیر عدد فرود چگالی ورودی بر هیدرودینامیک جریان گل آلود در کانال دوبعدی. پایان نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری. دانشکده کشاورزی. دانشگاه تربیت مدرس.
- ۹- محمد نژاد ب. و شمسایی ا. ۱۳۸۱. بررسی نقش جریانهای غلیظ در رسوب گذاری دریاچه سدها. مجموعه مقالات ششمین کنفرانس مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۲۷۷-۲۸۵.
- 10- Alavian V. 1986. Behavior of Density Current on an Incline, *J. Hydr. Eng, ASCE*, V118.
- 11- Altinakar M.S., Graf W.H. et Hopfinger E.J. 1990. Weakly Depositing Turbidity Current on Small Slopes, *J. Hydr. Res*, V:28/1, NL.
- 12- Altinakar M.S., Graf W.H., Hopfinger E.J. 1996. Flow structure in turbidity currents, *J. Hydr. Res*, V. 34: 713-718.
- 13- Bonneau R.T., Huppert H.E. and Lister J.R. 1993. Particle Driven Gravity Currents, *J. Fluid Mech*, V.250.
- 14- Cesare G.D., Schleiss A., Hermann F. 2001. Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation, *J. Hydraul Eng, ASCE*, 127(1):6-16.
- 15- Cesare G.D., Boillat J.L., Schleiss A. 2006. Circulation in stratified lakes due to floodinduced turbidity currents, *J. Hydraul Eng, ASCE*, 132(11):1508-17.
- 16- Chikita K. 1989. A field study on turbidity currents initiated from spring runoffs, *J. Water Resour, Res*, 25: 257-271.
- 17- Chikita K. 1990. Sedimentation by river-induced turbidity currents; field measurements and interpretation, *J. Sedimentology*, 37: 891-905.
- 18- Ellison T.H. and Turner J.S. 1959. Turbulent entrainment in stratified flows, *J. Fluid Mech*, 6: 423-448.
- 19- Firoozabadi B., Farhanieh b., Rad M. 2003. Hydrodynamics of 2-D Laminar Turbidity Current, *J. Hydr, Res*, 41(6):623-630.
- 20- Flix M., Sturton S., Peakall J. 2005. Combined Measurements of Velocity and Concentration in Experimental Turbidity Currents, *Journal of Sedimentary Geology*, 179:31-47.
- 21- Fukushima Y. and Hayakawa N. 1995. Dynamic of three Dimensional Inclined Thermal, *J. Hydr. Eng, ASCE*, V.121, N.8.
- 22- Graf W.H. and Altinakar M.S. 1991. *Hydrodynamique Eeyrolles*, Paris, F; Presses Polytechniques romandes, Lausanne, CH.
- 23- Graf W.H. and Altinakar M.S. 1998. *Fluvial Hydraulics-Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry*, Chapter 7, Wiley, New-York.
- 24- Hay A., Burling R.W. and Murray J.W. 1982. Remote acoustic detection of a turbidity current surge, *Science*, 217:833-835.
- 25- Hosseini S.A., Shamsai A., Ataie-Ashtani B. 2006. Synchronous measurements of the velocity and concentration in low density turbidity currents using an Acoustic Doppler Velocimeter, *J. Flow Measurement and Instrumentation*, 17: 59-68.
- 26- Huang H., Imran J., Pirmez C. 2005. Numerical model of turbidity currents with a deforming bottom boundary, *J. Hydraul Eng, ASCE*, 131(4):283-93.
- 27- Inman D.L., Nordstorm C.E., Flick R.E. 1976. Currents in submarine canyons: an air-sea-land interaction, *Annu Rev Fluid Mech*, 8:275-310.
- 28- Khrpounoff A., Vangriesheim A., Babonneau N., Crassous P., Dennielou B., Savoye B. 2003. Direct observation of intense turbidity current activity in the Zaire submarine valley at 4000 m water depth, *Mar Geol*, 194:151-8.
- 29- Kneller B.C. and Buckee M.J. 2000. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications, *J. Sedimentology*, 47: 62-94.
- 30- Keshtkar S.H., Ayyoubzadeh S.A., Firoozabadi B. and Afshin H. 2008. Experimental study of the opening height of entrance gate effect on vertical distribution velocity in turbidity current, *International Conference on Fluvial Hydraulics*, Izmir, Turkey.
- 31- Kubo Y., Nakajima T. 2002. Laboratory Experiments and Numerical Simulation of Sediment-Wave Formation by Turbidity Current, *Journal of Marine Geology*, 192: 105-121.
- 32- Lee H.Y., Yu W.S. 1997. Experimental Study of Reservoir Turbidity Current, *J. Hydr. Eng, ASCE*, 123 (6):520-528.
- 33- Middleton G.V. 1966b. Experiments on density and turbidity currents: I. Motion of the head, *Can J Earth Sci*,

- 3:523-46.
- 34- Oehy C.D., Schleiss A.J. 2007. Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles, *J. Hydraul Eng, ASCE*, 133(6):637-48.
- 35- Parker G., Garcia M., Fukushima Y. 1987. Experiments on turbidity currents over an erodible bed, *J. Hydraul. Res*, 25:123-147.
- 36- Parker G., Toniolo H. 2006. Note on the analysis of plunging of density flows, Submitted to the *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, January.
- 37- Salles T., Lopez S., Eschard R., Lerat O., Mulder T. and Cacas M.C. 2008. Turbidity current modelling on geological time scales, *Marine Geology* 248:127-150.
- 38- Schlapfer D.B., Buuhler J. and Dracus T. 1987. Dense inflows into narrow reservoir. *Proc.3rd Int. Symp. on Stratified Flows, Int. Assn. for Hydr. Res*, 3-5.
- 39- Singh J. 2008. Simulation of suspension gravity currents with different initial aspect ratio and layout of turbidity fence, *Applied Mathematical Modelling* 32: 2329-2346.
- 40- Stoschek O., Zimmermann C. 2006. Water Exchange and Sedimentation in an Estuarine Tidal Harbor Using Three-Dimensional Simulation, *J. Waterway, ASCE*, 132(5): 410 -414.
- 41- Swamee P.K. 2001. Design of high-rise pumping mains, *J. Urban Water*, 317-321.
- 42- Toniolo H. and Parker G. 2003. 1-D numerical modeling of reservoir sedimentation Proceeding, IAHR symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Barcelona, Spain, 2003: 457-468.
- 43- Toniolo H., Schultz J. 2005. Experiments on sediment trap efficiency in reservoirs, *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 10 (1): 13-24.
- 44- Turner J.S. 1973. *Buoyancy Effects in Fluids*, Cambridge University Press, London, U.K.
- 45- Yamamoto K., Yokoyama K., Takashima S. and Abe S. 2008. Behavior of the turbidity plume relating to a density current in a tidal river, *Proceedings in Marine Science*, 9: 69-82.
- 46- Yu W.S., Lee H.Y., Hsu S.H.M. 2000. Experiments on deposition behavior of fine sediment in a reservoir, *J. Hydraul Eng, ASCE*, 126(12):912-20.
- 47- Zeng J., Lowe D.R., Prior D.B., Wisenam W.J. & Bornhold B.D. 1991. Flow properties of turbidity currents in Bute inlet, British Columbia, *J. Sedimentology*, 38: 975-996.

Experimental Studies on Thickness and Vertical Velocity Distribution of Turbidity Current

Sh. Keshtkar¹ - S.A. Ayyoubzadeh^{2*} - B. Firoozabadi³

Received: 9-12-2009

Accepted: 3-10-2010

Abstract

Study of turbidity current hydrodynamics plays an important role in increasing the economical life of dams through reduction in sediment accumulation. In the present experimental study, the effect of entrance densimetric Froude number of turbidity current in sub and super critical conditions ($Fr = 0.6-3.5$) have been tested through effect of channel slope and change related to opening height of entrance gate on vertical distribution of flow velocity and currents' thickness under two dimensional flow conditions. The experiments were run in a 12 m-long by 0.2 m-wide by 0.5 m-high channel. Kaolin with the specific gravity of 2.65 and the mean particle diameter, D_{50} , equal to $4.5 \mu\text{m}$, was used as the cohesive suspended material. The results show that due to increasing in Froude number of entrance flow, the thickness of the turbidity current was increased while the layer-averaged velocity was decreased in the longitudinal direction. When the inlet densimetric Froude number reaches 0.7, the turbidity current tends to reach to a stable condition. Also the results show that the equivalent height of average velocity is about 0.8 times of the depth-averaged thickness of the current.

Keywords: Experimental Study, Vertical Velocity Distribution, Currents' Thickness, Turbidity Current

1, 2- PhD Student and Associate Professor, Department of Water Structures Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran

(*-Corresponding Author Email: ayyoub@modares.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran