

بررسی کارگذاری مانع‌های متوالی روی مشخصات و کنترل بدنه جریان غلیظ

سیدزانیار نیکخواه^۱، سیدمحمود کاشفی‌پور^۲ و مهدی دریائی^{۳*}

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

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

^۳ استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

(دریافت: ۹۶/۹/۳۰، پذیرش: ۹۷/۴/۲۴، نشر آنلاین: ۹۷/۴/۲۵)

چکیده

امروزه بخش عظیمی از حجم مفید مخازن سدها به واسطه رسوب‌گذاری از بین می‌رود. عامل اصلی رسوب‌گذاری در مخازن سدها جریان غلیظ می‌باشد. جریان غلیظ، جریانی است که بین دو سیال، به دلیل اختلاف چگالی آن‌ها به وجود می‌آید. لذا شناخت این پدیده و ارائه راه‌کارهایی به منظور مهار آن امری ضروری می‌باشد. در تحقیق حاضر ۴ حالت مختلف از کارگذاری ۳ مانع متوالی به منظور کنترل جریان غلیظ مورد بررسی قرار گرفته است. ارتفاع موانع با ۳ نسبت از ارتفاع بدنه جریان غلیظ و به صورت ۱، ۰/۷۵، ۰/۵ و $h_r = \frac{h_m}{h}$ در نظر گرفته شد که h_r که h_m ارتفاع مانع و h ارتفاع بدنه جریان غلیظ است. در ۳ حالت از کارگذاری موانع، ارتفاع آن‌ها یکسان و در حالت چهارم سه مانع به صورت صعودی با اندازه‌های مذکور در مقابل جریان قرار داده شد. آزمایش‌ها در ۳ شیب صفر، ۱/۵ و ۲/۵ درصد، با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر ($\rho_t = 1013/5 \text{ kg/m}^3$) و دبی ثابت ۱ لیتر بر ثانیه انجام شد. نتایج حاصل نشان داد که به کار بردن مانع‌های متوالی بر روی پروفیل‌های سرعت و غلظت تأثیرگذار است. همچنین بیشترین درصد مهار دبی بدنه جریان غلیظ در شرایط شیب صفر درصد و $h_r = 1$ به میزان ۶۳ درصد و کم‌ترین آن در شرایط شیب ۲/۵ درصد و $h_r = 0/5$ و به میزان ۲۲ درصد حاصل شد.

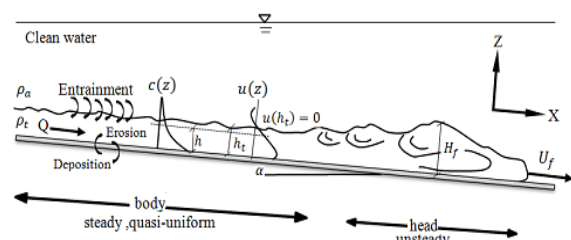
کلیدواژه‌ها: کنترل بدنه جریان غلیظ، مانع‌های متوالی، پروفیل سرعت، پروفیل غلظت.

۱- مقدمه

جریانی است که 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:

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

که در این رابطه، g شتاب ثقل بر حسب $(\frac{m}{s^2})$ ، g' شتاب ثقل کاهش یافته بر حسب $(\frac{m}{s^2})$ و ρ_a به ترتیب دانسیته سیال پیرامون و سیال غلیظ و بر حسب (kg/m^3) می‌باشند. در شکل (۱) شماتیکی از حرکت جریان غلیظ رسوبی ارائه شده است.



شکل ۱- شماتیکی از حرکت جریان غلیظ

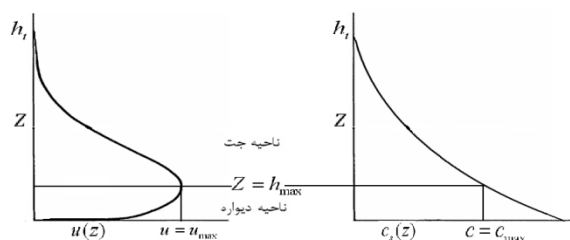
سدسازی از دیرباز برای ذخیره سازی آب‌های سطحی مورد توجه بوده است. نقش حیاتی آب در پیشرفت صنعت از یک سو، همچنین بحران کمبود منابع آب شیرین از سوی دیگر، اهمیت سدها را غیر قابل انکار کرده است. هزینه‌های بالای سدسازی، مشکلات زیست‌محیطی ایجاد شده ناشی از ساخت سد در بالادست و پایین‌دست آن و وضع قوانین سخت‌گیرانه بین‌المللی برای ساخت سدهای جدید، راه‌کارهای افزایش طول عمر مفید سدهای موجود را به یک موضوع بسیار با اهمیت مبدل ساخته است. به طور کلی راه‌کارهای افزایش طول عمر مفید مخازن سدها به دو دسته احیاء و کنترل تقسیم می‌شوند. روش احیاء برای زمانی است که رسوبات پشت دیواره سد ته‌نشین شده باشد. فلاشینگ و لایروبی دو نمونه از روش‌های احیاء هستند. با توجه به هزینه بردار بودن و همچنین تخریب‌ها زیست‌محیطی فلاشینگ و لایروبی، بهترین و به صرفه‌ترین کار، کنترل رسوبات و جریان غلیظ قبل از رسیدن به دیواره سد می‌باشد. مهم‌ترین عامل انتقال رسوبات در مخازن سد جریان غلیظ می‌باشد (دریائی، ۱۳۹۳). جریان غلیظ

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۶-۶۰۱۶۰۵۳

بحرانی مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که برای مهار کامل جریان غلیظ در هر شیب نیاز به یک ارتفاع مانع مشخص می‌باشد.

همان‌طور که عنوان شد تحقیقات Long (۱۹۷۰)، نشان داد که با قرار دادن مانعی با ارتفاع ۲ برابر ارتفاع بدنه جریان غلیظ می‌توان آن را به طور کامل مهار نمود. اما باید توجه داشت علاوه بر مسائل اقتصادی به منظور ساخت مانعی به ارتفاع ۲ برابر بدنه جریان غلیظ، استفاده از مانعی با این ارتفاع منجر به تشکیل جریان راکد پشت آن شده که در صورت شکست مانع، حجم زیادی از رسوبات به سمت بدنه سد حرکت خواهند کرد. لذا در تحقیق حاضر از موانع با تعداد بیشتر و با ارتفاع کمتر استفاده گردید. هدف از انجام تحقیق، بررسی عملکرد استفاده از مانع‌های متوالی بر روی شکل عمومی پروفیل‌های سرعت و غلظت بدنه جریان غلیظ و همچنین تأثیر این موانع بر کنترل بدنه جریان غلیظ می‌باشد.

شکل عمومی پروفیل سرعت و غلظت در شکل (۲) ارائه شده است. مشخصه‌های مهم موجود در پروفیل‌های سرعت و غلظت 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} (ناحیه دیواره) و قسمت دوم از h_{max} تا h_t (ناحیه جت). آشفتگی جریان در ناحیه دیواره ناشی از تأثیر بستر می‌باشد (Altinakar و همکاران، ۱۹۹۶).



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

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 (Ellison و Turner، ۱۹۵۹):

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

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

Long (۱۹۷۰)، با گذاشتن تک مانع مقابل جریان غلیظ به این نتیجه رسید که اگر تقریباً ارتفاع مانع دو برابر ارتفاع بدنه جریان غلیظ باشد، جریان غلیظ کامل مهار می‌شود.

Morris و Alexander (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 می‌تواند بر الگوی جریان و ضخامت رسوب‌گذاری تا فاصله قابل ملاحظه‌ای تأثیر بگذارد.

Schleiss و Oehy (۲۰۰۷)، مطالعاتی بر روی راه‌کارهای کنترل جریان غلیظ با استفاده از مانع نفوذپذیر و نفوذناپذیر مطالعاتی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند شکل عمومی پروفیل‌های سرعت و غلظت ضمن عبور از این موانع تغییر می‌یابد. Schleiss و Oehy (۲۰۱۰)، بر روی تأثیر پرده که به صورت شبکه ژئوتکستایل عمودی در مقابل جریان غلیظ قرار می‌گرفت، مطالعاتی انجام داده و به این نتیجه رسیدند که استفاده از پرده تأثیر کمی در مهار جریان غلیظ را دار می‌باشد.

دریایی و همکاران (۱۳۹۳)، اثر مانع و زبری بر کنترل جریان غلیظ رسوبی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند با کارگذاری زبری می‌توان ارتفاع مانع را برای کنترل جریان غلیظ کاهش داد. قربانی مقدم و قمشی (۱۳۹۴)، آزمایش‌هایی را برای بررسی اثر مانع‌های استوانه‌ای شکل با آرایش زیگزاگی بر روی جریان غلیظ نمکی انجام دادند. نتایج آن‌ها به این صورت بود که مانع‌ها سرعت و ارتفاع رأس جریان غلیظ را کاهش می‌دهند و با افزایش تراکم مانع‌ها، شدت کاهش سرعت و ارتفاع بیشتر می‌شود.

دریایی و همکاران (۱۳۹۴)، در یک سری مطالعه آزمایشگاهی تأثیر زبری بر روی پروفیل‌های سرعت و غلظت بدنه جریان غلیظ رسوبی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند زبری اثر قابل توجهی روی شکل عمومی پروفیل‌های سرعت و غلظت دارد. Oehy و همکاران (۲۰۱۰)، اثر صفحه شیب‌دار را بر روی خصوصیات جریان غلیظ بررسی کردند.

Lin و Ho (۲۰۱۵)، جریان غلیظ را در دو شیب، یکی بدون پوشش و دیگری با پوششی از گیاهان مقاوم با ارتفاع بلند مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در شیب تندتر و بدون حضور پوشش گیاهی، افت انرژی به دلیل وجود سیال پیرامون در جریان غلیظ اتفاق خواهد افتاد.

Varjavand و همکاران (۲۰۱۵)، اثر زبری کف بر روی جریان غلیظ نمکی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند جریان غلیظ ضمن عبور از روی زبری دچار برخاستگی می‌شود. برای این هدف از زبری‌های مخروطی و استوانه‌ای با سه ارتفاع مختلف استفاده شد.

Asghari و همکاران (۲۰۱۶)، اثر ارتفاع تک مانع را بر روی کنترل جریان غلیظ برای دو نوع جریان غلیظ زیر بحرانی و فوق

جدول ۱- نسبت‌های مشخصه‌های پروفیل سرعت و غلظت

(Altinakar و همکاران، ۱۹۹۶)

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

 c_b^* غلظت در فاصله $0.05h_t$ از کف که بیانگر غلظت جریان غلیظ در کف است.

۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، در فلو می به طول ۷۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر با شیب متغیر ۱- تا ۳/۸۶ درصد انجام شد. این فلو می دارای یک مخزن اختلاط به حجم ۱۰۰۰ لیتر و یک تانک در بالا به منظور ثابت نگه داشتن هد جریان غلیظ، که هر کدام از این مخزن‌ها مجهز به هم‌زن می‌باشند. ابتدا جریان غلیظ نمکی در مخزن پایینی با غلظت مورد نظر تهیه و سپس به وسیله پمپ کوچکی به مخزن بالا پمپ می‌شد. مخزن دوم که در بالای فلو می تعبیه شده، خود به دو قسمت تفکیک شده و با پر شدن قسمت اول، آب به قسمت مجاور سرریز و تخلیه شده که با این کار همیشه هد جریان غلیظ ثابت نگه داشته می‌شد. فلو می مورد استفاده با یک دریچه در ابتدا به دو قسمت تقسیم و بدین وسیله جریان غلیظ از سیال پیرامون جدا شده و در هنگام شروع آزمایش با استفاده از یک اهرم این دریچه تا ارتفاع مشخص بالا رفته و جریان غلیظ وارد سیال پیرامون می‌شد (شکل (۳)).

در تحقیق حاضر ۴ حالت مختلف از کارگذاری ۳ مانع متوالی به منظور کنترل جریان غلیظ مورد بررسی قرار گرفت. ارتفاع موانع با ۳ نسبت از متوسط ارتفاع بدنه جریان غلیظ برای نمونه‌های شاهد و به صورت ۱، ۰/۷۵، ۰/۵ در نظر گرفته شد $h_r = \frac{h_m}{h}$ که h_m ارتفاع مانع و h متوسط ارتفاع بدنه جریان غلیظ برای نمونه‌های شاهد می‌باشد. متوسط ارتفاع بدنه جریان غلیظ برای نمونه‌های شاهد برابر ۵ سانتی‌متر و با استفاده از رابطه (۲) تعیین گردید. لذا ارتفاع موانع مورد استفاده برابر ۲/۵، ۳/۷۵ و ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در ۳ حالت از کارگذاری موانع، ارتفاع آن‌ها یک اندازه و در حالت چهارم سه مانع به صورت صعودی برای اندازه‌های مذکور در مقابل جریان کارگذاری شد. فاصله موانع از هم ثابت و برابر ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در انجام آزمایش‌ها دبی جریان غلیظ ثابت و برابر ۱ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین جریان غلیظ مورد استفاده در این تحقیق از نوع نمکی بوده که با غلظت ثابت ۲۰ گرم در لیتر ($\rho_t = 1013/5 \text{ kg/m}^3$) مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش‌ها در ۳ شیب صفر درصد، ۱/۵ درصد و ۲/۵ درصد انجام شد. همچنین تعداد ۳ آزمایش بدون در نظر گرفتن مانع‌ها در شرایط مذکور و به عنوان آزمایش شاهد در نظر گرفته شد. در مجموع ۱۵ سری آزمایش صورت پذیرفت. برای برداشت غلظت بدنه از نمونه‌گیر سیفونی استفاده شد (شکل (۴)).

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

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.

به منظور تعیین حالت زیر بحرانی و فوق بحرانی جریان غلیظ از عدد فرود دنسیمتریک مطابق رابطه (۵) استفاده می‌شود:

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{g' h \cos \theta}} \quad (5)$$

که در این رابطه Fr_d عدد فرود دنسیمتریک و θ زاویه شیب کف بستر با امتداد افقی می‌باشد. رابطه‌ای که توزیع سرعت در ناحیه دیواره را بیان می‌کند به صورت زیر می‌باشد (Altinakar و همکاران، ۱۹۹۶):

$$\frac{u(z)}{u_{max}} = \left(\frac{z}{h_{max}} \right)^n \quad (6)$$

توزیع سرعت در ناحیه جت از یک معادله شبه گوسین به صورت زیر پیروی می‌کند (Altinakar و همکاران، ۱۹۹۶):

$$\frac{u(z)}{u_{max}} = \exp \left[-\alpha_c \left(\frac{z - h_{max}}{h - h_{max}} \right)^m \right] \quad (7)$$

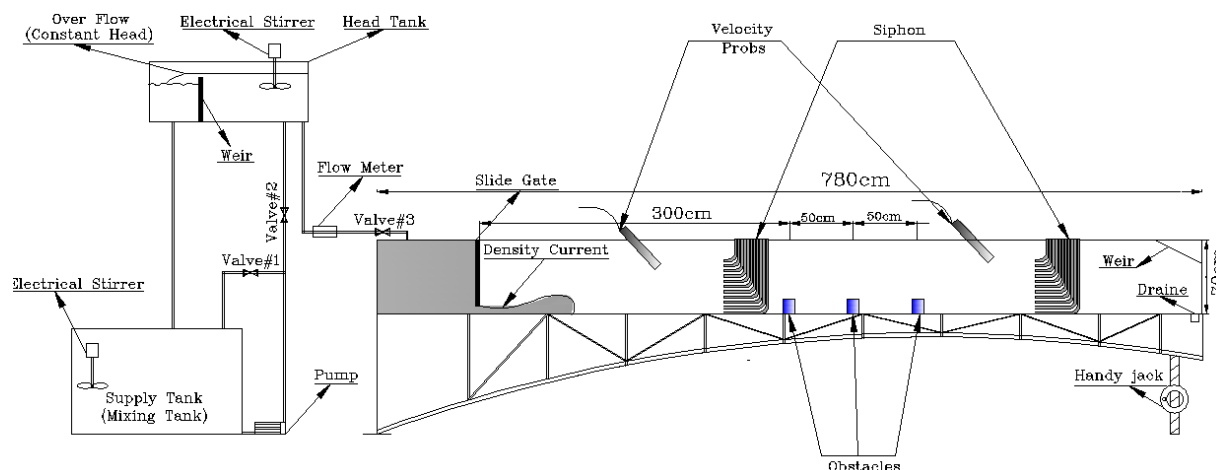
پروفیل غلظت در ناحیه دیواره از رابطه تجربی مشابه پروفیل سرعت در این ناحیه تبعیت می‌کند (Hosseini و همکاران، ۲۰۰۶):

$$\frac{c_s(z)}{c_{max}} = \left(\frac{z}{h_{max}} \right)^{-\psi} \quad (8)$$

همچنین توزیع غلظت در ناحیه جت از یک معادله شبه گوسین مشابه توزیع سرعت در این ناحیه به صورت زیر پیروی می‌کند (Hosseini و همکاران، ۲۰۰۶):

$$\frac{c_s(z)}{c_{max}} = \exp \left[-\beta_c \left(\frac{z - h_{max}}{h - h_{max}} \right)^{\lambda_c} \right] \quad (9)$$

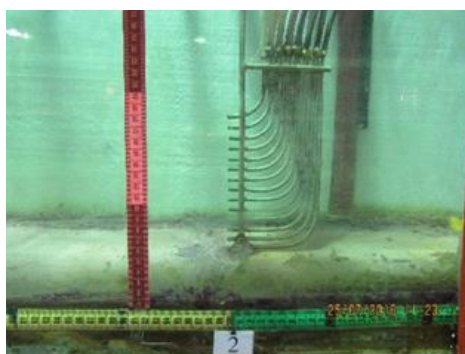
در این روابط u_* سرعت برشی، k ، n ، α_c ، m ، ψ ، β_c و λ_c ضرایب ثابت می‌باشند. Altinakar و همکاران (۱۹۹۶)، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی نسبت‌های مشخصه‌های پروفیل سرعت و غلظت را به صورت جدول (۱) بیان کردند:



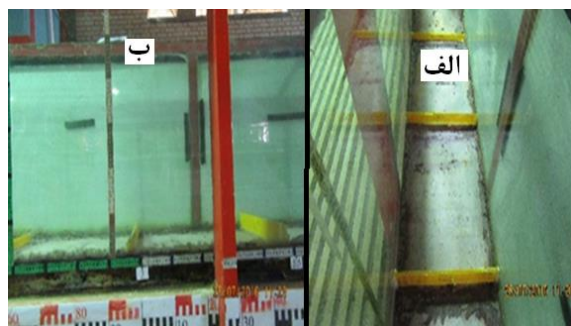
شکل ۳- شماتیکی از فلوم و تجهیزات مورد استفاده

رابطه ارائه گردید. هدف از این کار تبدیل ECهای اندازه‌گیری شده در حین آزمایش‌ها به غلظت بود.

به منظور ساده نویسی در متن، هر کدام از سناریوهای تعریف شده با استفاده از علائم اختصاری مشخص و در جدول (۲) تعریف شدند. لازم به ذکر است در آزمایش‌های ۱ تا ۹ ارتفاع هر سه مانع ثابت و معادل مقدار h_r بوده، اما در آزمایش‌های ۱۰ تا ۱۲ موانع سه‌گانه به سه اندازه معادل ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ به ترتیب در مقابل جریان غلیظ قرار گرفته‌اند. آزمایش‌های ۱۳ تا ۱۵ به عنوان شاهد و بدون کارگذاری موانع هستند.



شکل ۴- نمونه‌گیر سیفونی مورد استفاده



شکل ۵- قرارگیری موانع مورد استفاده در فلوم: الف) نما از بالا، ب) نمای جانبی

مانع‌های مورد استفاده از جنس پلکسی گلاس ساخته شد. این مانع‌ها در فواصل ۳، ۳/۵ و ۴ متری از ابتدای فلوم به صورت متوالی قرار داده شدند (شکل ۵).

روش انجام آزمایش‌ها بدین صورت بود که ابتدا جریان غلیظ با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر ($\rho_t = 1013/5 \text{ kg/m}^3$) در مخزن اختلاط با حل کامل نمک در مقدار مشخص آب تهیه می‌شد. پس از پمپ کردن محلول آب نمک به تانک بالا و ثابت شدن ارتفاع، با باز کردن شیر خروجی تانک بالا، جریان به قسمت ابتدای فلوم در بالادست دریچه منتقل می‌شد. قسمت پایین دست دریچه نیز با آب زلال تا ارتفاع مورد نظر پر می‌شد. برای مشاهده حرکت جریان غلیظ و تشخیص آن از آب زلال، به جریان غلیظ در مخزن اختلاط، پرمنگنات اضافه شد. پس از هم سطح شدن آب ساکن و جریان غلیظ در بالادست و پایین دست دریچه، دریچه باز شده و جریان غلیظ شروع به حرکت می‌کرد. همان طور که عنوان شد به منظور برداشت پروفیل غلظت بدنه جریان غلیظ از سیفون (شکل ۴) استفاده گردید. با استفاده از این سیفون نمونه‌گیری از بدنه جریان غلیظ از فاصله ۴ میلی‌متری تا ۱۳۹ میلی‌متری از کف با فواصل ۱۵ میلی‌متر انجام شد. سپس میزان EC نمونه‌های به دست آمده با استفاده از دستگاه EC سنج اندازه‌گیری و با استفاده از رابطه (۱۰) میزان غلظت در هر عمق تعیین گردید:

$$C(\text{gr/lit}) = (0.0009EC^2) + (0.51EC) - 0.8862 \quad (10)$$

که در این رابطه EC هدایت هیدرولیکی بر حسب میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد.

رابطه (۱۰) از کالیبره کردن EC سنج با اندازه‌گیری EC غلظت‌های مشخص از محلول آب و نمک در آزمایشگاه به دست آمد. بدین صورت که غلظت‌های مشخص از محلول آب و نمک تهیه و EC آنها اندازه‌گیری شده و بر اساس اطلاعات حاصل این

که به کمک روابط ۲ الی ۴ تعیین شدند. همچنین b عرض کف فلولم و برابر $۰/۳۵$ متر می‌باشد. متغیرهای مورد نظر در این تحقیق مطابق رابطه (۱۳) می‌باشد:

$$f(h, h_{max}, u_{max}, h_t, h_m, c_b, C_{max}, C_s, \rho_a, \rho_t, g, U) = 0 \quad (13)$$

با در نظر گرفتن U, ρ_a و g به عنوان متغیرهای تکراری با استفاده از روش پای باکینگهام، آنالیز ابعادی به صورت زیر انجام شد:

$$f(Fr_d, \frac{c_b}{C_{max}}, \frac{c_b}{C_s}, \frac{h_{max}}{h}, \frac{u_{max}}{U}, \frac{h_t}{h}, \Delta Q_s, h_r) = 0 \quad (14)$$

کلیه پارامترها در متن معرفی شده‌اند.

۳- نتایج و بحث

همان طور که عنوان شد هدف از تحقیق حاضر بررسی کارگذاری سری موانع بر روی مشخصات پروفیل سرعت، پروفیل غلظت و میزان کنترل بدنه جریان غلیظ می‌باشد. محدوده اعداد فرود دنسیمتریک در آزمایش‌ها به صورت $0.42 < Fr_d < 0.72$ برآورد گردید و لذا در کلیه آزمایش‌ها جریان در حالت زیر بحرانی قرار داشت.

۳-۱- پروفیل‌های سرعت

همان طور که عنوان شد یکی از اهداف این تحقیق بررسی تأثیر سری موانع بر روی شکل عمومی پروفیل‌های غلظت و سرعت می‌باشد. در جدول (۳)، متوسط مشخصه‌های پروفیل سرعت برای نمونه‌های شاهد ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود این نتایج با نتایج حاصل از تحقیقات Altinakar و همکاران (۱۹۹۶)، تقریباً مطابقت دارد. دلیل اختلاف نتایج را می‌توان ناشی از تفاوت در شرایط انجام آزمایش‌ها، تعداد آزمایش‌ها و مواد مورد استفاده جهت تهیه جریان غلیظ دانست.

در شکل (۶) پروفیل‌های سرعت در قبل و بعد از موانع متوالی کار شده در شیب صفر درصد به عنوان نمونه ارائه شده است.

جدول ۳- نسبت‌های مشخصه‌های پروفیل سرعت و غلظت برای

حالت شاهد		
$\frac{h_{max}}{h}$	$\frac{u_{max}}{U}$	$\frac{h_t}{h}$
۰/۲۸	۱/۳۵	۱/۵۱

جدول ۲- علائم اختصاری سناریوهای تعریف شده

ردیف	h_r	$\langle I \rangle S$	علائم اختصاری
۱	صفر		$h_{r(0.5)}S_0$
۲	۰/۵		$h_{r(0.5)}S_{1.5}$
۳	۲/۵		$h_{r(0.5)}S_{2.5}$
۴	صفر		$h_{r(0.75)}S_0$
۵	۰/۷۵		$h_{r(0.75)}S_{1.5}$
۶	۲/۵		$h_{r(0.75)}S_{2.5}$
۷	صفر		$h_{r(1)}S_0$
۸	۱		$h_{r(1)}S_{1.5}$
۹	۲/۵		$h_{r(1)}S_{2.5}$
۱۰	صفر		$h_{r(i)}S_0$
۱۱	حالت صعودی		$h_{r(i)}S_{1.5}$
۱۲			$h_{r(i)}S_{2.5}$
۱۳	صفر		WS_0
۱۴	حالت شاهد		$WS_{1.5}$
۱۵			$WS_{2.5}$

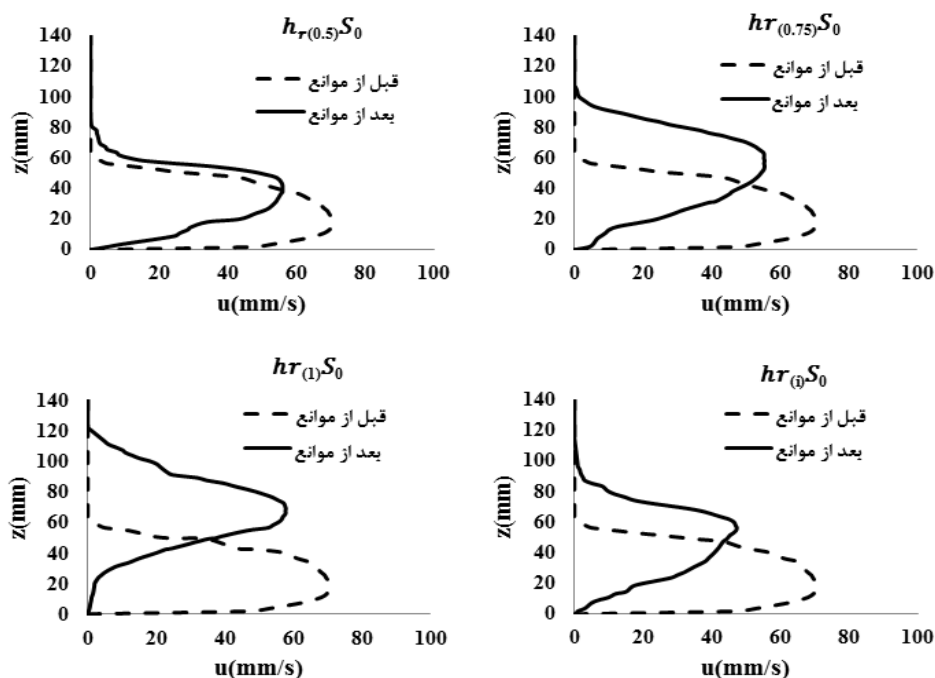
پروفیل‌های غلظت در بالادست موانع در مقطعی با فاصله $۰/۵$ متری بالادست اولین مانع و در پایین دست موانع در مقطعی با فاصله ۱ متری پایین دست آخرین مانع، جایی که آشفتنگی ناشی از برخورد جریان غلیظ با موانع از بین رفته و جریان دوباره به صورت کامل تشکیل می‌شد، برداشت شدند. پروفیل‌های سرعت بدنه با استفاده از دستگاه DOP2000 و در همان مقاطعی که پروفیل‌های غلظت جریان غلیظ برداشت شدند، برداشت شد. این دستگاه قادر به برداشت ۱۵۰ پروفیل سرعت در مقطع و به صورت یک بعدی در زمان انجام آزمایش می‌باشد. میزان درصد کاهش دبی بدنه جریان غلیظ از رابطه زیر به دست آمد:

$$\Delta Q_s = \frac{Q_{sa} - Q_{sb}}{Q_{sa}} \times 100 \quad (11)$$

که در این رابطه ΔQ_s درصد کاهش دبی بدنه جریان غلیظ و Q_{sa} و Q_{sb} به ترتیب دبی بدنه جریان غلیظ در قبل و بعد از موانع و بر حسب gr/s می‌باشد. مقدار دبی بدنه جریان غلیظ به صورت زیر محاسبه شده است:

$$Q_s = C_s \times h \times U \times b \quad (12)$$

که C_s غلظت متوسط بدنه (gr/lit) ، h ارتفاع بدنه جریان غلیظ (m) و U سرعت متوسط بدنه جریان غلیظ بر حسب (m/s)



شکل ۶- تغییرات شکل پروفیل سرعت بدنه جریان غلیظ قبل و بعد موانع برای شیب صفر درصد

(۵) ارائه گردیده است. همان طور که در این جدول مشاهده می شود، مشخصه $\frac{u_{max}}{u}$ با تغییراتی در حدود ۴ درصد و به صورت کاهشی کمترین تغییر، پس از آن مشخصه $\frac{h_t}{h}$ با تغییراتی در حدود ۳۲ درصد و به صورت افزایشی و در نهایت مشخصه $\frac{h_{max}}{h}$ با تغییراتی در حدود ۲۲۵ درصد و به صورت افزایشی بیشترین میزان تغییر را داراست.

جدول ۵- درصد تغییرات ناشی از به کارگذاری موانع متوالی

تا $h_{r(1)}$ بر روی مشخصه های پروفیل سرعت نسبت به حالت

شاهد		
$\frac{h_{max}}{h}$	$\frac{u_{max}}{u}$	$\frac{h_t}{h}$
+۲۲۵	-۴	+۳۲

دلیل اختلاف فاحش بین مشخصه $\frac{h_{max}}{h}$ و دو مشخصه دیگر را می توان این گونه توجیه نمود که با توجه به شکل (۶)، افزایش ارتفاع موانع کارگذاری شده تا $h_{r(1)}$ منجر به افزایش ارتفاع محل وقوع سرعت ماکزیمم (h_{max}) به صورت قابل توجهی نسبت به سایر مشخصه های پروفیل سرعت می شود.

بعد از برخورد جریان غلیظ با موانع، سرعت جریان غلیظ به دلیل کاهش غلظت و همچنین استهلاک ناشی از برخورد، کاهش پیدا می کند. سرعت متوسط بدنه نقش مستقیم در مقدار دبی رسوبی دارد. لذا کاهش سرعت می تواند عاملی مثبت بر کاهش دبی بدنه جریان غلیظ باشد.

همان طور که در این شکل مشاهده می شود، کارگذاری موانع تأثیر بسزایی بر روی شکل پروفیل سرعت دارد. با افزایش ارتفاع موانع، از سرعت ماکزیمم کاسته شده و محل وقوع سرعت ماکزیمم به ارتفاع بیشتری از بستر منتقل می شود. دلیل این پدیده را می توان این گونه بیان نمود که با حرکت جریان غلیظ و ورود سیال پیرامون به درون بدنه از غلظت آن کاسته شده و سیال غلیظ، سبک تر می شود. لذا ارتفاع بدنه افزایش می یابد. به منظور بررسی تأثیر موانع روی شکل پروفیل های سرعت، در جدول (۴) متوسط مشخصه های پروفیل سرعت برای هر ارتفاع از کارگذاری موانع در شیب های مورد نظر ارائه شده است.

جدول ۴- متوسط مشخصه های پروفیل سرعت برای هر ارتفاع

از کارگذاری موانع در شیب های مورد نظر

$\frac{h_{max}}{h}$	$\frac{u_{max}}{u}$	$\frac{h_t}{h}$	
۰/۲۸	۱/۳۵	۱/۵۱	WS
۰/۸۴	۱/۲۸	۱/۶۸	$h_{r(0.5)}$
۰/۸۶	۱/۳۱	۱/۶۹	$h_{r(0.75)}$
۰/۹۱	۱/۳	۱/۹۸	$h_{r(1)}$
۰/۹۰	۱/۲۳	۱/۸۸	$h_{r(1)}$

درصد تغییرات ناشی از کارگذاری موانع متوالی تا $h_{r(1)}$ بر روی مشخصه های پروفیل سرعت نسبت به حالت شاهد در جدول

۳-۲- پروفیل‌های غلظت

در جدول (۶)، متوسط مشخصه‌های پروفیل غلظت برای نمونه‌های شاهد ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این نتایج با نتایج حاصل از تحقیقات Altinakar و همکاران (۱۹۹۶)، تقریباً مطابقت دارد. همان طور که عنوان شد دلیل اختلاف نتایج را می‌توان ناشی از تفاوت در شرایط انجام آزمایش‌ها، تعداد آزمایش‌ها و مواد مورد استفاده جهت تهیه جریان غلیظ دانست.

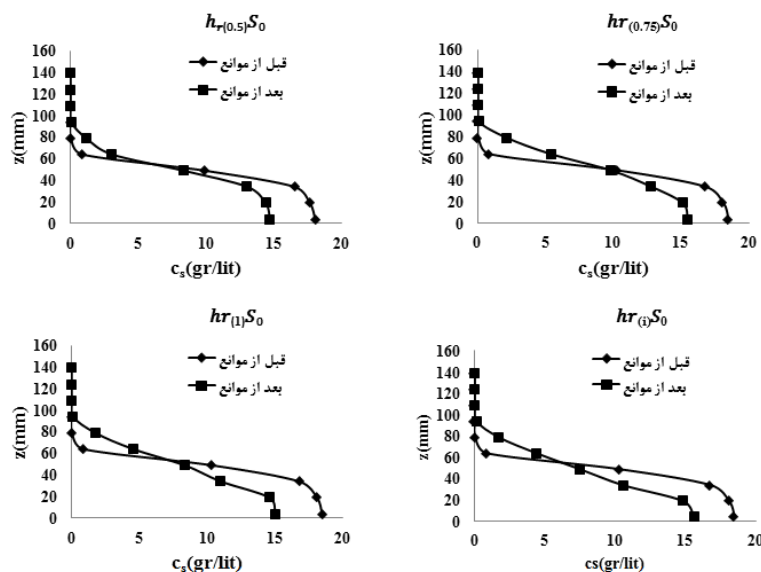
جدول ۶- نسبت‌های مشخصه‌های پروفیل غلظت برای حالت

شاهد	
$\frac{C_b}{C_{max}}$	$\frac{C_b}{C_s}$
۱/۰۳	۱/۴۷

غلظت و کاهش غلظت آن منجر می‌شود. لازم به ذکر است آزمایش‌های حاضر با استفاده از جریان غلیظ نمکی انجام شده است. حال آن که در جریان غلیظ رسوبی علاوه بر موارد فوق، نشست رسوبات نیز منجر به کاهش غلظت می‌شود. لذا میزان تأثیر سری موانع در مهار جریان غلیظ رسوبی بیشتر خواهد بود. میزان این کاهش در کارگذاری موانع‌های مختلف متفاوت بوده و با افزایش ارتفاع موانع، غلظت بیشتری از بدنه کاهش پیدا کرده است. همچنین ارتفاع بدنه جریان غلیظ بعد از موانع‌ها به دلیل آشفتگی ناشی از برخورد با موانع، افزایش پیدا کرده است که تقاطع نمودارهای پروفیل غلظت بیانگر این موضوع می‌باشد. یکی دیگر از عوامل افزایش ارتفاع بدنه جریان غلیظ را می‌توان کاهش g' که ناشی از کاهش غلظت بدنه جریان غلیظ می‌باشد، دانست. کاهش g' منجر به سبک‌تر شدن جریان غلیظ و در نتیجه افزایش ارتفاع بدنه می‌شود. به منظور بررسی تأثیر موانع روی شکل پروفیل‌های غلظت، در جدول (۷) متوسط مشخصه‌های پروفیل سرعت برای هر ارتفاع از کارگذاری موانع در شیب‌های مورد نظر ارائه شده است.

جدول ۷- متوسط مشخصه‌های پروفیل غلظت برای هر ارتفاع از

کارگذاری موانع در شیب‌های مورد نظر		
$\frac{C_b}{C_{max}}$	$\frac{C_b}{C_s}$	
۱/۰۳	۱/۴۷	WS
۲/۷۲	۲/۵۶	$h_{r(0.5)}$
۲/۲۶	۱/۶۹	$h_{r(0.75)}$
۳/۳۹	۳/۵۶	$h_{r(1)}$
۳/۷۲	۲/۶۳	$h_{r(i)}$



شکل ۷- پروفیل‌های غلظت برای شیب صفر درصد در قبل و بعد از موانع

دلیل این پدیده را می‌توان این گونه توجیه نمود که با افزایش شیب، سرعت جریان افزایش یافته و در نتیجه بعد از برخورد با مانع‌ها جریان بیشتری از روی مانع‌ها عبور کرده و مقدار کمتری از جریان برگشت داده می‌شود.

بیشترین درصد کنترل دبی غلظت بدنه مربوط به $h_{r(1)}S_0$ و کم‌ترین کاهش مربوط به $h_{r(0.5)}S_{2.5}$ و به ترتیب برابر ۶۳ و ۲۲ درصد به دست آمد. با افزایش ارتفاع موانع متوالی از $h_{r(0.5)}$ به $h_{r(1)}$ ، میزان درصد کنترل دبی بدنه جریان غلیظ در شیب‌های ۰، ۱/۵ و ۲/۵، به ترتیب ۷۵، ۷۶ و ۱۰۵ درصد افزایش یافت.

در صورت استفاده از مانع‌های صعودی، درصد کنترل دبی بدنه جریان غلیظ در شیب‌های ۰، ۱/۵ و ۲/۵ درصد به ترتیب برابر با ۵۰، ۴۴ و ۳۶ درصد به دست آمد.

در مطالعات دریائی و همکاران (۱۳۹۴)، با به کار بردن زبری در دوطرف مانع، میزان مهار جریان غلیظ تقریباً به صورت کامل انجام شد. آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به صورت رسوبی بوده است. لذا همان طور که عنوان شد مسئله نشست رسوبات نیز به عنوان یک عامل مهم در کاهش غلظت و به دنبال آن کنترل بیشتر جریان غلیظ می‌باشد. در تحقیق حاضر بیشترین میزان کنترل در حدود ۶۳ درصد است. به نظر می‌رسد چنانچه آزمایش‌های موجود در تحقیق حاضر نیز با جریان غلیظ رسوبی انجام شود، میزان مهار جریان غلیظ بیشتر شود. لازم به ذکر است شاید به کار بردن زبری به همراه مانع درصد مهار جریان غلیظ را افزایش داده باشد، اما ممکن است با وقوع سیلاب و تشکیل جریان غلیظ، فضای بین زبری‌ها پر از رسوب شوند و کارایی خود را از دست بدهند. هر چند توجه به این نکته نیز ضروری است که مهار یک جریان غلیظ ممکن است تا حد زیادی از ورود رسوبات به پشت بدنه سد جلوگیری کند و عمر مفید سد را افزایش دهد. حال آن که موانع متوالی به نسبت زبری در زمان بیشتری از رسوب پر می‌شوند. همچنین مطالعات قربانی مقدم و قمشی (۱۳۹۴)، نشان داد میزان مهار جریان غلیظ نمکی با استفاده از موانع استوانه‌ای را در بیشترین تراکم تقریباً ۸۰ درصد نشان داد که در مقایسه با تحقیق حاضر میزان کنترل بیشتری می‌باشد. باید توجه داشت اجرای موانع استوانه‌ای با تراکم زیاد در بالادست سد ممکن است توجیه اقتصادی نداشته باشد.

همچنین در جدول (۱۰) به منظور مقایسه تأثیر کارگذاری موانع در حالت $h_{r(i)}$ نسبت به سایر حالت‌ها، تغییرات درصد کنترل بدنه جریان غلیظ در حالت $h_{r(i)}$ در شیب‌های مورد نظر نسبت به کارگذاری سایر حالات کارگذاری موانع در این شیب‌ها ارائه گردید. به عنوان مثال در شیب ۱/۵ درصد، میزان کنترل جریان غلیظ در حالت $h_{r(i)}$ به میزان ۱۶ درصد از حالت $h_{r(0.75)}$ در این شیب بیشتر می‌باشد. سایر درصد تغییرات نیز در جدول (۱۰) ارائه شده است.

درصد تغییرات ناشی از به کارگذاری موانع متوالی تا $h_{r(1)}$ بر روی مشخصه‌های پروفیل سرعت نسبت به حالت شاهد در جدول (۸) ارائه گردیده است.

جدول ۸- درصد تغییرات ناشی از به کارگذاری موانع متوالی تا $h_{r(1)}$ بر روی مشخصه‌های پروفیل غلظت نسبت به حالت شاهد

$\frac{C_b}{C_{max}}$	$\frac{C_b}{C_s}$
+۲۲۹	+۱۴۲

با توجه به این جدول مشاهده می‌شود که تغییرات میزان مشخصه $\frac{C_b}{C_s}$ حدود ۱۴۲ درصد و به صورت افزایشی و مشخصه $\frac{C_b}{C_{max}}$ نیز در حدود ۲۲۹ درصد و به صورت افزایشی می‌باشد. با توجه به توضیحاتی که تا کنون داده شد دلیل آن را می‌توان افزایش C_b و کاهش C_s و C_{max} به واسطه افزایش ارتفاع موانع کارگذاری شده دانست.

۳-۳- میزان کنترل دبی بدنه جریان غلیظ

در این تحقیق کنترل یا کاهش دبی بدنه جریان غلیظ به وسیله کارگذاری موانع‌های متوالی بررسی گردید. پارامترهای غلظت و سرعت، دو رکن اساسی در تعیین مقدار دبی جریان غلیظ هستند. مقدار دبی بدنه جریان غلیظ با استفاده از رابطه (۱۲) برای هر یک از سناریوهای تعریف شده در قبل و بعد از موانع تعیین شد. میزان کنترل جریان غلیظ از رابطه (۱۱) محاسبه و مقادیر درصد کنترل دبی بدنه جریان غلیظ برای سناریوهای مورد نظر در تحقیق حاضر در جدول (۹) ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول (۹) می‌توان دریافت که با افزایش شیب، درصد کنترل دبی بدنه جریان غلیظ در تمامی آزمایش‌ها، کاهش می‌یابد.

جدول ۹- مقادیر کنترل دبی بدنه جریان غلیظ

ردیف	آزمایش	درصد کنترل بدنه جریان غلیظ
۱	$h_{r(0.5)}S_0$	۳۶
۲	$h_{r(0.5)}S_{1.5}$	۲۹
۳	$h_{r(0.5)}S_{2.5}$	۲۲
۴	$h_{r(0.75)}S_0$	۴۴
۵	$h_{r(0.75)}S_{1.5}$	۳۸
۶	$h_{r(0.75)}S_{2.5}$	۳۰
۷	$h_{r(1)}S_0$	۶۳
۸	$h_{r(1)}S_{1.5}$	۵۱
۹	$h_{r(1)}S_{2.5}$	۴۵
۱۰	$h_{r(i)}S_0$	۵۰
۱۱	$h_{r(i)}S_{1.5}$	۴۴
۱۲	$h_{r(i)}S_{2.5}$	۳۶

۵- مراجع

دریائی م، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر هم زمان زبری و مانع روی کنترل جریان غلیظ"، رساله دکتری، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۹۳.

دریائی م، کاشفی پور س م، قمشی م، "بررسی اثر مانع و زبری در کنترل جریان غلیظ رسوبی"، نشریه دانش آب و خاک، ۱۳۹۳، ۲۴ (۴)، ۹-۱.

دریائی م، کاشفی پور س م، قمشی م، "مطالعه آزمایشگاهی تأثیر زبری بر روی پروفیل‌های سرعت و غلظت بدنه جریان غلیظ رسوبی"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۱۳۹۴، ۴۵ (۴)، ۱۹-۲۸.

قربانی مقدم ع ا، قمشی م، "بررسی آزمایشگاهی کنترل جریان غلیظ نمکی به کمک مانع‌های استوانه‌ای شکل"، مجله پژوهش آب ایران، ۱۳۹۴، ۹ (۳)، ۱۱۱-۱۲۰.

Altinakar MS, Graf WH, Hopfinger EJ, "Flow structure in turbidity currents", Journal of Hydraulic Research, 1996, 34 (5), 713-718.

Asghari Pari SA, Kashefipour SM, Ghomeshi M, "An experimental study to determine the obstacle height required for the control of subcritical and supercritical gravity currents", European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2017, 21 (9), 1080-1092.

Ellison TH, Turner JS, "Turbulent entrainment in stratified flows", Journal of Fluid Mechanic, 1959, 6 (3), 423-448.

Ho HC, Lin YT, "Gravity currents over a rigid and emergent vegetated slope", Advances in Water Resources, 2015, 76, 72-80.

Hosseini SA, 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.

Long RR, "Blocking effects in flow over obstacles", Tellus 22, 1970, 471-480.

Morris SA, Alexander J, "Changes in flow direction at a point caused by obstacles during passage of a density current", Journal of Sedimentary Research, 2003, 73, 621-629.

Oehy CD, Schleiss AJ, "Control of turbidity currents in reservoirs by solid and permeable obstacles", Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133 (6), 637-648.

Oehy CD, De Cesare G, Schleiss AJ, "Effect of inclined screen on turbidity current", Journal of Hydraulic Research, 2010, 48 (1), 81-90.

Varjavand P, Ghomeshi M, Dalir AH, Farsadizadeh D, Gorgij AD, "Experimental observation of saline underflows and turbidity currents, flowing over rough beds", Canadian Journal of Civil Engineering, 2015, 42 (11), 834-844.

می‌توان این گونه نتیجه گرفت که در حالت $h_{r(i)}$ میزان کنترل بدنه جریان غلیظ در شیب‌های مورد نظر نسبت به حالت‌های $h_{r(0.5)}$ و $h_{r(0.75)}$ بیشتر و نسبت به حالت $h_{r(1)}$ کمتر می‌باشد. لذا در صورت استفاده در شرایط واقعی، استفاده از حالت $h_{r(i)}$ نسبت به دو حالت $h_{r(0.5)}$ و $h_{r(0.75)}$ ارجح می‌باشد.

جدول ۱۰- تغییرات درصد کنترل بدنه جریان غلیظ در حالت

$h_{r(i)}$ در شیب‌های مورد نظر نسبت به کارگذاری موانع متوالی با

اندازه یکسان

	$S = 2.5$	$S = 1.5$	$S = 0$
$h_{r(0.5)}$	+۶۴	+۵۲	+۳۹
$h_{r(0.75)}$	+۲۰	+۱۶	+۱۴
$h_{r(1)}$	-۲۰	-۱۴	-۲۱

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر مانع‌های متوالی بر کنترل غلظت بدنه جریان غلیظ مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از چهار سری موانع استفاده شد. سری اول، دوم و سوم متشکل از سه مانع هم اندازه با ارتفاع‌های ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ برابر ارتفاع بدنه جریان غلیظ ($h_{r(0.5)}$ ، $h_{r(0.75)}$ و $h_{r(1)}$) و سری چهارم از سه مانع متوالی با ارتفاع‌های ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ برابر ارتفاع بدنه جریان غلیظ به صورت صعودی استفاده شد ($h_{r(i)}$). مهم‌ترین نتایج این تحقیق به صورت زیر می‌باشد:

- کارگذاری موانع بر روی شکل پروفیل‌های سرعت و غلظت تأثیر بسزایی دارد.
- استفاده از موانع متوالی در حالت $h_{r(1)}$ بیشترین تأثیر را بر روی مشخصه $\frac{h_{max}}{h}$ از پروفیل سرعت و به میزان ۲۲۱+ درصد نسبت به حالت شاهد دارا می‌باشد.
- استفاده از موانع متوالی در حالت $h_{r(1)}$ تأثیر قابل توجهی بر روی مشخصه‌های $\frac{c_b}{c_s}$ و $\frac{c_b}{c_{max}}$ از پروفیل غلظت و به میزان ۱۵۰+ و ۲۵۰+ درصد نسبت به حالت شاهد دارا می‌باشد.
- با افزایش شیب، تأثیر موانع متوالی بر روی کنترل جریان غلیظ کاهش می‌یابد.
- در حالت $h_{r(i)}$ میزان کنترل بدنه جریان غلیظ در شیب‌های مورد نظر نسبت به حالت‌های $h_{r(0.5)}$ و $h_{r(0.75)}$ بیشتر و نسبت به حالت $h_{r(1)}$ کمتر می‌باشد.

EXTENDED ABSTRACT

Investigation of Installation Consecutive Obstacles on the Characteristics and Controlling of Density Current Body

Seyed Zaniyar Nikkhah, Seyed Mahmood Kashefipour, Mehdi Daryaei *

Faculty of Water sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 21 December 2017; Accepted: 15 July 2018

Keywords:

Density current body control, Consecutive obstacles, Velocity profile, Concentration profile.

1. Introduction

Density current is the most important factor of sediment transport in the dam reservoirs. Density current is the current which is caused by density difference between two fluids on the acceleration of gravity. The effective acceleration of gravity acting on the flow, which is known as driving force for density flow is expressed as follows:

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

Where, g is the acceleration of gravity as (m/s^2) , g' is the reduced acceleration of gravity as (m/s^2) , ρ_a and ρ_t are the density of ambient fluid and density fluid respectively as (kg/m^3) . Fig. 1 shows the schematic of density current.

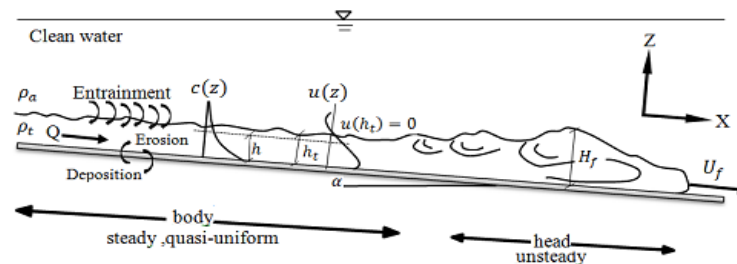


Fig. 1. A schematic of density current

Installing a single obstacle to the density current, Long (1970) concluded that when the obstacle height is approximately twice the height of the body of density current, it is fully controlled. Asghari Pari et al. (2016) studied the effect of single obstacle height on controlling the density current for two types of subcritical and supercritical density currents. Ohey et al. (2010) investigated the impact of inclined plane on the characteristics of the density current. As mentioned before, Long's studies (1970) showed that the density current will be fully controlled if we install an obstacle twice the height of the body of the density current. However, it should be noted that in addition to economic issues for building an obstacle to the density current, which is twice the height of it, it may then lead to the formation of stagnant flow behind it and increases the risk of entraining of large volume of sediments to dam if the obstacle breaks. Therefore, this study employs higher number of obstacles with less height. This study aims to examine the effect of using consecutive obstacles on the general

* Corresponding Author

E-mail addresses: zanyar.n.69@gmail.com (Seyed Zaniyar Nikkhah), kashefipour@scu.ac.ir (Seyed Mahmood Kashefipour), mehdi.daryaei@yahoo.com (Mehdi Daryaei).

form of velocity profiles as well as the concentration of the density current body and the impact of these obstacles on the controlling the body of density current.

2. Methodology

The experiments were carried out in a flume with a length of 780 cm and a height of 70 cm with adjustable bed slope of -1 to 3.8%. The flume had a mixing tank with the capacity of 1000 litres and a head tank to maintain a head flow constant (Fig. 2.).

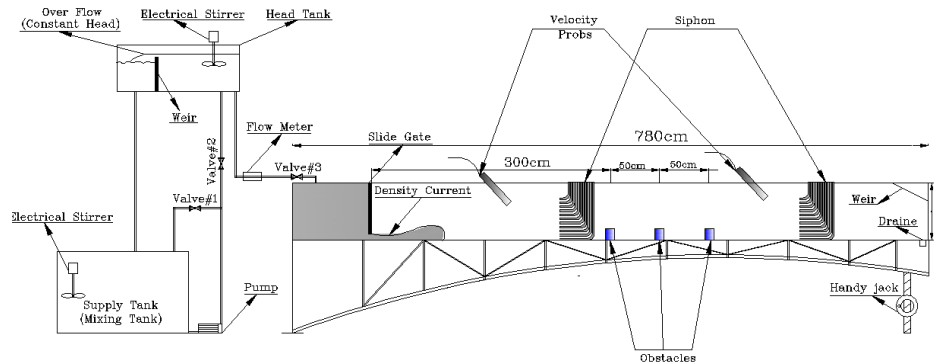


Fig. 2. Schematic of the flume used in the laboratory

This study investigated four different modes for the installation of 3 consecutive obstacles in order to control the density current. Three height proportions of obstacles were determined according to the average body height of density current of the control samples, namely $h_r = 0.5, 0.75, 1$ ($h_r = \frac{h_m}{h}$ where h_m is the obstacle height and h is the average body height of density current of the control sample). The average value of the density current body height of the control samples was determined to be 5 cm. Therefore, the values of obstacle heights used were determined to be 2.5, 3.75 and 5 cm. The heights were considered equal in the 3 modes of installation, and in the fourth mode, the three obstacles were installed in ascending order of the values mentioned earlier. The obstacles were placed at the constant distance of 50 cm. During the experiments, the density current discharge was considered constant and equal to 1 l/s. Moreover, the saline density current used in the study has a constant density value of 20 gr/lit ($\rho_t = 1013.5 \text{ kg/m}^3$). The experiments were carried out using 3 bed slopes of 0%, and 1.5%, 2.5%. Moreover, 3 control experiments were carried out without considering the obstacles under the aforementioned conditions. A total of 15 series of experiments were carried out.

3. Results and discussion

Fig. 3 provides, as an example, the velocity profiles before and after the consecutive obstacles installed using the bed slope of 0%. $\frac{u_{max}}{u}$, $\frac{h_t}{h}$ and $\frac{h_{max}}{h}$ are three parameters to indicate the general form of velocity profile. The results showed that with an increase in the heights of obstacles from $h_r = 0.5$ to $h_r = 1$, the parameter $\frac{u_{max}}{u}$ experiences the minimum rate of change which is about 4%, which is decreasing, and the parameter $\frac{h_{max}}{h}$ experiences the maximum rates of change which 225%, which is increasing. Fig. 4 provides, as an example, the concentration profiles before and after the consecutive obstacles installed using the bed slope of 0%. $\frac{c_b}{c_s}$ and $\frac{c_b}{c_{max}}$ are two parameters to indicate the general form of concentration profile. The rate of change for the parameter $\frac{c_b}{c_s}$ is about 142%, which is increasing, and for the parameter $\frac{c_b}{c_{max}}$ is about 229%, which is also increasing.

The maximum percentage value of the discharge control of density current body is associated with $h_r = 1$ using a bed slope of 0%, and the minimum percentage value is associated with $h_r = 0.5$ using a bed slope of 2.5% which are respectively 63% and 22%. With an increase in the heights of consecutive obstacles from $h_r = 0.5$ to $h_r = 1$, the percentage values of the discharge control of density current body increased by 75%, 76%, and 105% respectively using the bed slopes of 0%, and 1.5%, 2.5%. In case of using ascending order of obstacles, the percentage values of the discharge control of density current body was obtained 50, 44 and 36% respectively using the bed slopes of 0%, and 1.5%, 2.5%.

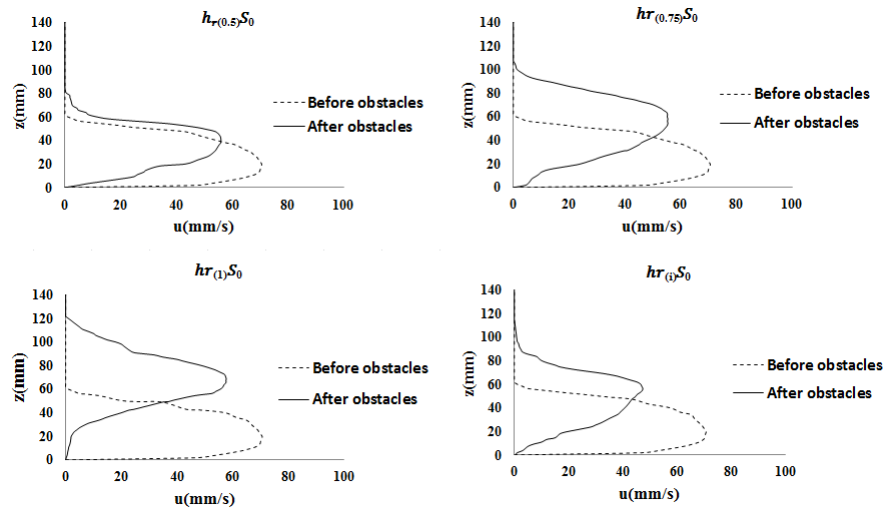


Fig. 1. Changes in the forms of velocity profiles of density current body before and after the obstacles installed using the bed slope of 0%.

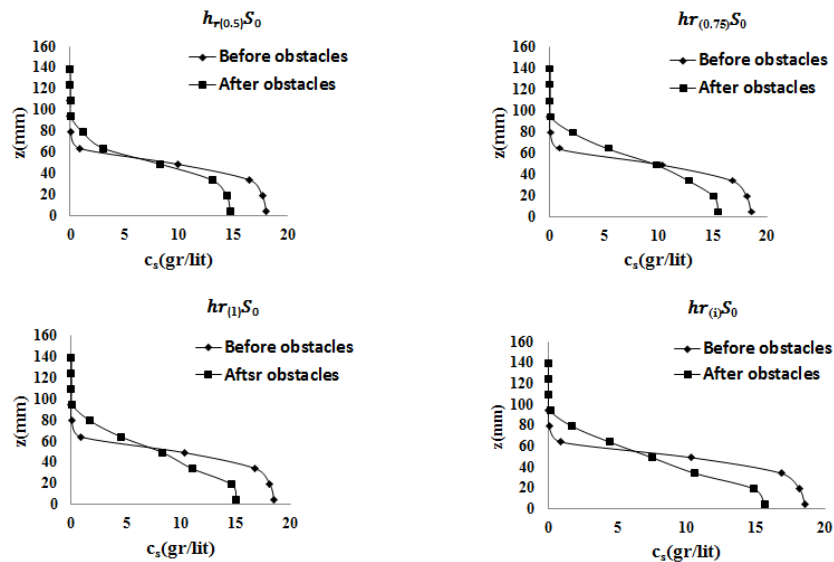


Fig. 4. The concentration profiles before and after the obstacles installed using bed slope of 0%

4. Conclusions

- Installation of consecutive obstacles has significant effect on the velocity and concentration profiles.
- Using consecutive obstacles in the mode of $h_r = 1$ has the highest impact on the parameter of $\frac{h_{max}}{h}$ of the velocity profile by the rate of +221% compared with the control mode.
- Using consecutive obstacles in the mode of $h_r = 1$ has a significant impact on the parameters of $\frac{c_b}{c_s}$ and $\frac{c_b}{c_{max}}$ of concentration profile by the rate of +150 and +250 percent compared with the control mode.
- The impact of consecutive obstacles on controlling of density current body is reduced by increasing the bed slope.

5. References

- Asghari Pari SA, Kashefipour SM, Ghomeshi M, "An experimental study to determine the obstacle height required for the control of subcritical and supercritical gravity currents", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21 (9), 1080-1092.
- Long RR, "Blocking effects in flow over obstacles", *Tellus* 22 (5), 1970, 471-480.
- Ohey CD, De Cesare G, Schleiss AJ, "Effect of inclined screen on turbidity current. *Journal of Hydraulic Research*, 2010, 48 (1), 81-90.